

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan koulutusohjelma

BK10A0410 Kandidaatintyö ja seminaari

TYÖSTÖVÄRÄHTELYT METALLIN SORVAUKSESSA JA JYRSINNÄSSÄ:
PERUSTEET, EHKÄISEMINEN JA MATEMAATTINEN MALLINTAMINEN

CHATTER VIBRATIONS IN METAL TURNING AND MILLING:
BASICS, PREVENTION AND MATHEMATICAL MODELLING

Lappeenrannassa 25.11.2013

Vesa-Ville Taneli Hurskainen

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	4
1.1	Tutkimuksen tausta, tavoitteet ja rajaus.....	4
1.2	Julkaisukatsaus.....	5
2	LASTUAVA TYÖSTÖ JA SEN STABILITEETTI	7
2.1	Lastuavan työstön peruskäsitteitä.....	7
2.2	Lastuamisprosessin stabiliteetti.....	10
2.3	Värähtelyjen luokittelu.....	14
2.3.1	Työstövärähtelyt.....	15
2.3.2	Vapaat värähtelyt.....	17
2.3.3	Pakkovärähtelyt.....	18
2.3.4	Yhteenvedo värähtelyistä.....	18
2.4	Työstövärähtelyjen välttäminen.....	20
2.4.1	Prosessin ulkopuoliset menetelmät.....	21
2.4.2	Prosessinaikaiset menetelmät.....	22
2.4.3	Passiiviset menetelmät.....	22
2.4.4	Aktiiviset menetelmät.....	23
2.4.5	Yhteenvedo välttämismenetelmistä.....	23
3	VÄRÄHTELYKÄYTTÄYTYMISEN SELVITTÄMINEN	25
3.1	Matemaattiset mallinnusmenetelmät.....	25
3.1.1	Värähtelykäyttäytymisen karakterisointi.....	26
3.1.2	Taajuustasoanalyysi ja aikatasosimulaatio.....	28
3.1.3	Esimerkkejä mallinnusmenetelmistä.....	30
3.2	Esimerkkejä muista menetelmistä.....	31
4	POHDINTA	32
4.1	Työstövärähtelyt ja niiden syntymekanismit.....	32
4.2	Työstövärähtelyjen välttäminen.....	33
4.3	Värähtelykäyttäytymisen mallintaminen.....	34
4.4	Menetelmien käytännöllisyys.....	35
4.5	Jatkotutkimuskohteet.....	36
5	YHTEENVETO	37
	LÄHTEET	38

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

a	Lastuamissyvyys	[mm]
d	Halkaisija	[mm]
e	Kosketusleveys	[mm]
F	Leikkuuvoima	[N]
F_p	Pääleikkuuvoima	[N]
F_s	Syöttövoima	[N]
F_v	Varsivoima	[N]
n	Pyörimisnopeus	[1/min]
s	Syöttö	[mm/r] / [mm/min]
v	Lastuamisnopeus	[m/min]
α	Päästökulma	[°]
β	Teroituskulma	[°]
γ	Rintakulma	[°]
ϕ	Vaihe-ero	[rad]
<i>CNC</i>	Tietokoneistettu numeerinen ohjaus (Computer Numerical Control)	
<i>DDE</i>	Viiveellinen differentiaaliyhtälö (Delay Differential Equation)	
<i>FEM</i>	Elementtimenetelmä (Finite Element Method)	
<i>FRF</i>	Taajuusvastefunktio (Frequency Response Function)	
<i>RCSA</i>	Reseptanssikytentäälirakenneanalyysi (Receptance Coupling Substructure Analysis)	
<i>SLD</i>	Stabiliteettikuvaaja (Stability Lobe Diagram)	
<i>SSV</i>	Vaaputus (Spindle Speed Variation)	

1 JOHDANTO

Lastuavissa työstömenetelmissä eli koneistuksessa esiintyvät työstöväärähtelyt ja niiden esiintymistä seuraava työstöprosessin stabiliteetin menetys ovat ongelmia, joiden olemassaolo on tiedetty ja joita on tutkittu konetekniikan alalla jo kauan. Ensimmäisiä selvityksiä asiasta tehtiin jo 1900-luvun alussa, mutta vielä nykypäivänä työstöväärähtelyjen esiintyminen on yleistä. Väärähtelyt ovat tuttuja myös Lappeenrannan teknillisen yliopiston konepajatekniikan laboratoriossa työskenteleville. Ilmiö on paitsi yleinen myös varsin monimutkainen, ja siitä aiheutuvat taloudelliset ja ajalliset menetykset ovat varsin merkittäviä. Nämä seikat ovat tehneet siitä alan tutkijoiden jatkuvan kiinnostuksen kohteen.

1.1 Tutkimuksen tausta, tavoitteet ja rajaus

Tämä Lappeenrannan teknillisen yliopiston konetekniikan osastolle tehty tutkimus on tarkoitettu suomenkieliseksi tiivistelmäksi ilmiöstä ja sen syntymekanismeista sekä lyhyeksi esittelyksi ilmiön esiintymisen välttämiseen tähtääville menetelmille. Tutkimusta voidaan pitää myös esiselvityksenä aiheen mahdolliselle jatkotutkimukselle. Käytetty tutkimusmenetelmä on puhdas kirjallisuustutkimus, eli tutkimukseen ei kuulu empiirisiä kokeita.

Tutkimuksen tavoitteena on siis selvittää työstöväärähtelyjä ilmiönä sekä kartoittaa niiden välttämiskeinoja. Tutkimuksen teettäjän toiveesta erityistä huomiota osoitetaan prosessin värähtelykäyttäytymisen matemaattiseen mallintamiseen pohjaaville välttämismenetelmille. On myös pohdittava, mitkä mallinnusmenetelmistä voisivat olla käyttökelpoisia käytännössä esim. yliopiston konepajatekniikan laboratoriossa. Tutkimusta ohjaavat seuraavat tutkimuskysymykset:

- Mitä työstöväärähtelyt ovat ja mistä ne syntyvät?
- Kuinka (millä keinoin) työstöväärähtelyjä voidaan välttää?
- Kuinka (millä keinoin) työstöprosessin värähtelykäyttäytymistä voidaan mallintaa?
- Mitkä menetelmistä ovat edellytystensä ja muiden ominaisuuksiensa perusteella käytännössä käyttökelpoisia?

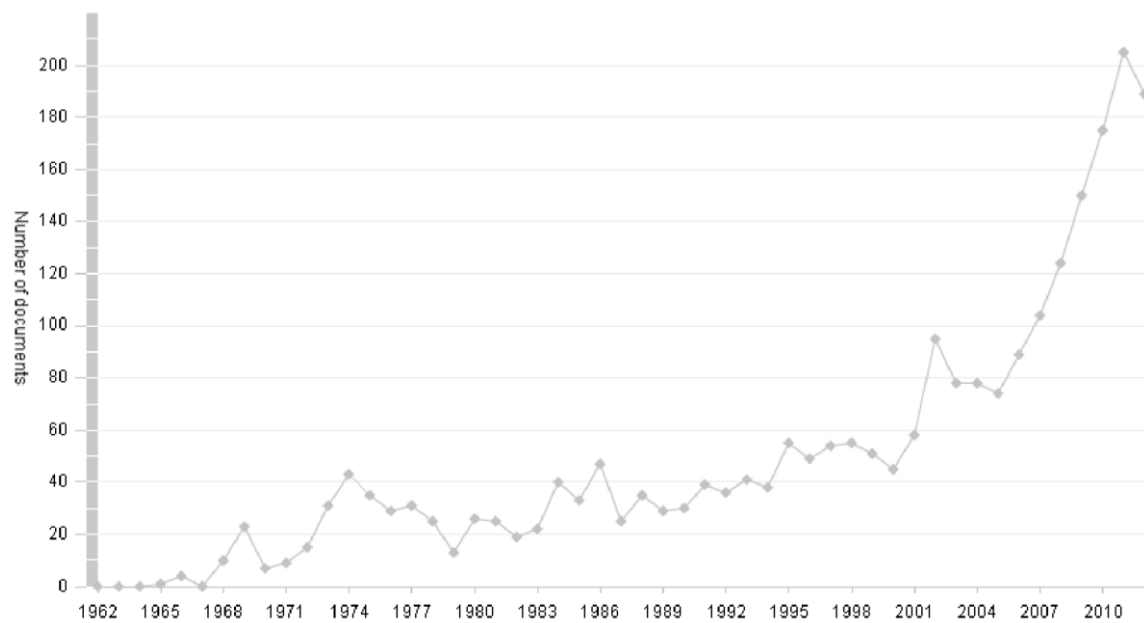
Jotta tutkimus pysyisi kandidaatintyön rajoissa, sen laajuudelle asetetaan erinäisiä rajoituksia. Tutkimuksessa keskitytään lastuavista työstömenetelmistä niihin kahteen, joiden värähtelyjä on menetelmien yleisyydestä johtuen tutkittu eniten: sorvaukseen ja jyrshintään. Työssä syvennytään nimenomaan *työstöväärähtelyihin* (engl. chatter). Termillä viitataan tässä tekstissä tiettyyn lastuavissa työstöprosesseissa esiintyvien värähtelyjen kategoriaan (ks. 2.3.1). Muut työstöprosessissa vaikuttavat värähtelytyypit esitellään kohdassa 2.3. Työstöväärähtelyjen välttämismenetelmistä tutkimus kohdistuu erityisesti matemaattiseen mallintamiseen perustuviin menetelmiin. Muut menetelmät esitellään kohdassa 2.4. Tekstissä ei syvennytä aaltoliikkeen tai värähtelyn yleiseen teoriaan, ja lukijan oletetaan ymmärtävän harmonisen värähtelyn peruskäsitteet.

Teksti on jaettu kolmeen pääosaan. Luvussa 2 kerrataan tarvittava lastuavan työstön peruskäsitteistö, määritellään lastuamisprosessien stabiiliteetin käsite ja käydään läpi työstöprosessin värähtelyjen eri lajeja sekä työstöväärähtelyjen välttämismenetelmiä. Luku 3 käsittelee värähtelykäyttäytymisen selvittämismenetelmiä. Lopuksi luvussa 4 pohditaan edellisessä osassa esiteltyjen menetelmien käytännöllisyyttä sekä jatkotutkimuskohteita.

Monille aihealueen englanninkielisille termeille (esim. chatter, stability lobe, process damping) ei ole löydettävissä yleisesti hyväksytyjä suomenkielisiä käännöksiä. Näiden termien käännökset ovat kirjoittajan omia. Käännettäessä on aina pyritty säilyttämään termin alkuperäinen merkitys. Väärinkäsitysten välttämiseksi ja englanninkielisen materiaalin käytön helpottamiseksi pyritään esittämään termin alkuperäinen englanninkielinen muoto sen esiintyessä ensimmäisen kerran.

1.2 Julkaisukatsaus

Jotta saataisiin kuva työstöväärähtelyjen tutkimuksen suuntauksista, suoritettiin aihealueen julkaisuille tietokantahaku. Haku suoritettiin 11.11.2013 Elsevier-kustantamon tietokannasta SciVerse Scopus. Hakemalla julkaisujen otsikoista, tiivistelmistä ja avainsanoista englanninkielisellä hakusanalla ”chatter” löytyi konetekniikan aihealueelta yhteensä 2694 julkaisua. Kuvassa 1 esitetään tulosten määrä vuosittain edeltävien viidenkymmenen vuoden ajalta.



Kuva 1. Julkaisuhaun tulosten määrä vuosittain aikavälillä 1962 – 2012 (haettu 7.8.2013).

Voidaan havaita, että kiinnostus tutkimusalaan on jatkuvasti lisääntynyt. Erityisesti aivan viime vuosina julkaisujen määrän kasvu on ollut verraten nopeaa. Vuoden 2013 julkaisulukema oli hakupäivänä jo 166, joten kiinnostus aihetta kohtaan ei myöskään ole osoittanut huomattavia laantumisen merkkejä.

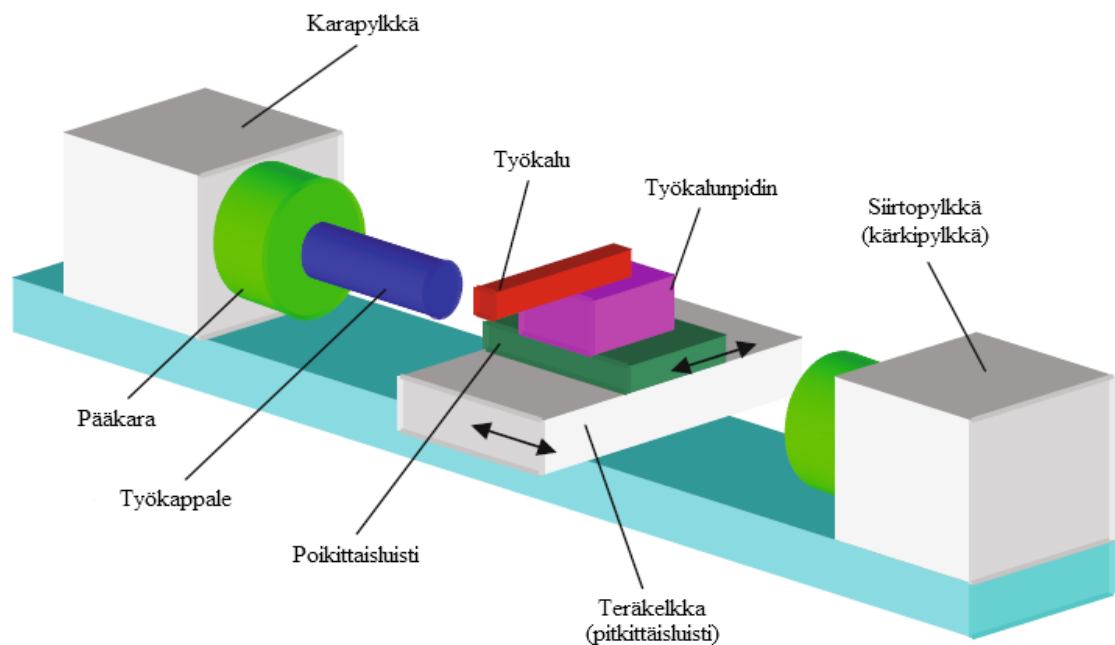
Alan kolme tuotteliainta tutkijaa olivat hakutulosten valossa Yusuf Altintaş (61 julkaisua, University of British Columbia), Erhan Budak (36 julkaisua, Sabancı University) ja Jiri L. Tlustý (26 julkaisua, University of Florida). Samat henkilöt samassa järjestyksessä löysivät selvityksessään yli kaksi vuotta aiemmin myös Quintana ja Ciurana [1].

2 LASTUAVA TYÖSTÖ JA SEN STABILITEETTI

Metallin lastuava työstö eli koneistus on joukko yleisesti käytettyjä valmistusmenetelmiä. Niissä halutun muotoinen kappale saadaan aikaan poistamalla aihioista materiaalia lastu kerrollaan. Yleisimmin käytettyihin lastuamismenetelmiin kuuluvat sorvaus ja jyrshintä. Tässä luvussa käsitellään lastuavan työstön peruskäsitteitä, erityisesti sorvauksen ja jyrshinnän osalta, ja määritellään stabiliteetin käsite. Lisäksi luvussa esitellään työstöprosessin värähtelyjen kategoriat sekä esitetään yleiskuva niiden välttämismenetelmistä.

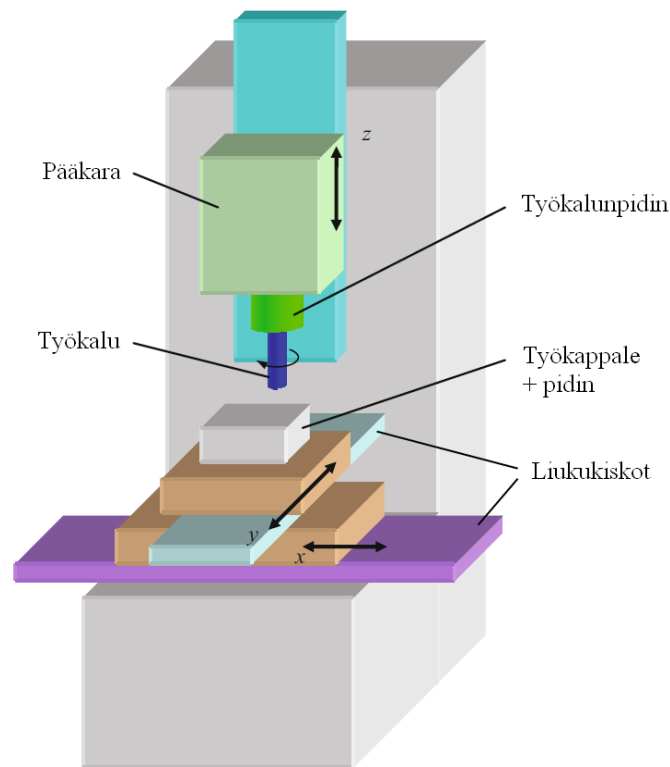
2.1 Lastuavan työstön peruskäsitteitä

Sorvaus on lastuava työstömenetelmä, jolla valmistetaan tavallisesti pyörähdyssymmetrisiä kappaleita. Sorvauksessa lastuaminen tapahtuu pyörittämällä työstettävää kappaletta vasten moniakselisesti liikkuvaan kiinnikkeeseen asetettua työkalua. Menetelmällä onnistuu tietyin rajoituksin ja laitteesta riippuen sekä kappaleen ulko- että sisäpuolisten muotojen valmistaminen. Sorvi voi olla manuaalinen, jolloin laitteen käyttäjä ohjaa työkalun sijaintia työstön aikana, mutta yleensä se on teollisuudessa nykyään tietokoneistetulla numeerisella ohjauksella (CNC) varustettu. Kuvassa 2 esitetään erään sorvityypin toimintaperiaate. [2][3]



Kuva 2. Kärkisorvin periaatekuva. Mukailten: [3]

Jyrsintä on lastuava työstömenetelmä, jossa työstö tapahtuu pyörivän, useimmiten monihampaisen työkalun avulla. Työkalua liikutetaan työkappaleeseen nähden moniakselisesti, mikä saadaan aikaan liikuttamalla laitteesta riippuen itse työkalua tai jyrsinkoneen pöytää. Yleensä liikutetaan kuitenkin pöytää. Jyrsimällä voidaan (laitteesta riippuen) valmistaa muun muassa tasomaisia tai käyriä pintoja sekä uria tai hammasmuotoja. Jyrsintä voidaan jakaa kehä- eli lieriöjyrsintään (lastuaminen työkalun sivulla eli lieriöpinnalla) ja otsajyrsintään (lastuaminen työkalun otsa- eli päätypinnalla). Kuten sorvit, myös jyrsinkoneet voivat olla manuaalisia tai CNC-laitteita. Kuvassa 3 esitetään pystysorvin toimintaperiaate. [2][3]



Kuva 3. Pystyjyrsimen periaatekuva. Mukailten: [3]

Työkaluun ajatellaan koneistuksessa kuuluvan lastuavan terän lisäksi myös sen varsi. Englanninkielistä termiä ”tool” ei pidä sekoittaa termin ”machine tool” kanssa, joka tarkoittaa pelkän työkalun sijasta koko työstökoneetta. *Työkappale* tarkoittaa yksinkertaisesti lastuamisprosessissa työstettävää kappaletta.

Työstöliikkeet tarkoittavat kolmea työstön kannalta kriittistä liikettä, jotka suorittaa työstömenetelmästä riippuen työstöjärjestelmän eri elementti. Nämä liikkeet ovat *päätyöstöliike*, *syöttöliike* ja *asetusliike*. Päätyöstöliikkeen suorittaa sorvauksessa työkappale ja jyrinnässä työkalu, molemmissa pyörivänä liikkeenä. Syöttöliikkeen ja asetusliikkeen suorittaa sorvauksessa työkalu ja jyrinnässä koneesta riippuen joko työkalu tai (yleensä) työkappale työstökoneen pöydän liikkeen kautta. [2][3]

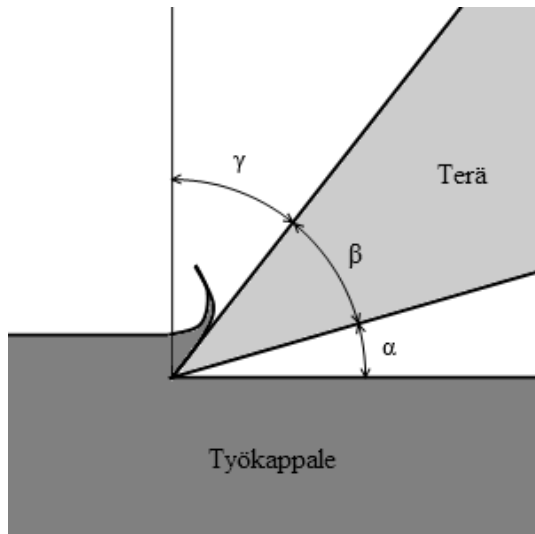
Työstöarvoilla tarkoitetaan niitä työstöprosessin parametreja, jotka ovat laitteen käyttäjän säädettävissä. Sorvauksessa työstöarvot ovat *lastuamisnopeus* (v), *pyörimisnopeus* (n), *syöttö* (s) ja *lastuamissyvyys* (a). Jyrinnässä esiintyy edellä mainittujen lisäksi myös *kosketusleveys* (e). [2]

Lastuamisnopeus (v) tarkoittaa nopeutta, jolla lastuamistyökalu ja työkappaleen pinta liikkuvat toisiinsa nähden päätyöstöliikkeen suunnassa. *Pyörimisnopeus* (n) taas tarkoittaa työstöprosessin pyörivän (päätyöstöliikkeen suorittavan) elementin kierrostaajuutta. Lastuamisnopeuden ja pyörimisnopeuden välillä vallitsee yhteys $v = \pi d n$, jossa d on pyörivän elementin halkaisija. Sorvauksessa ja jyrinnässä käytetään yleensä lastuamisnopeudelle yksikköä m/min ja pyörimisnopeudelle yksikköä 1/min. [2]

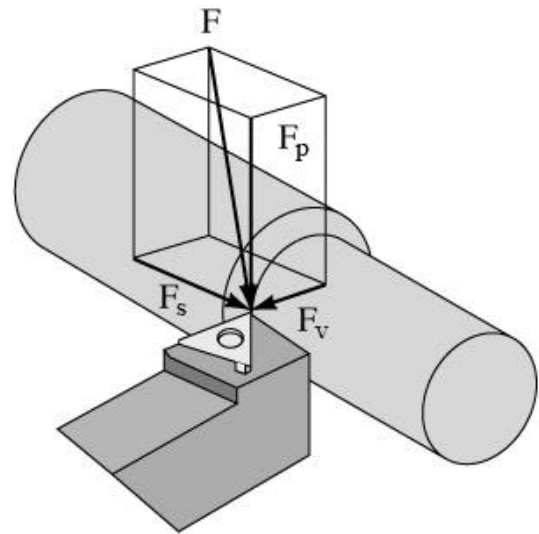
Syöttö (s) ja *lastuamissyvyys* (a) määräävät poistettavan lastun poikkileikkausmitat. Syöttö tarkoittaa työkalun liikenopeutta syöttöliikkeen suunnassa. Lastuamissyvyys taas tarkoittaa leikkauksen syvyyttä (työkappaleen pinnasta mitattuna) asetusliikkeen suunnassa. Syötön yksikkö on useimmiten sorvattaessa mm/r ja jyrittäessä mm/min. Lastuamissyvyuden yksikkö on millimetri. [2]

Jyrinnässä esiintyvä *kosketusleveys* (e) tarkoittaa leikkauksen leveyttä syöttöliikkeeseen nähden poikittaisessa suunnassa, ja se ilmoitetaan yleensä millimetreinä. Kosketusleveyden maksimi on työkalun halkaisija d . [2]

Kuvassa 4 näkyvät kaikista lastuavista teristä löytyvät *teräkulmat*: *päästökulma* (α), *teroituskulma* (β) ja *rintakulma* (γ). Kuva 5 taas esittää lastuamisen aikana työkappaleen ja työkalun välillä vaikuttavaa *leikkuuvoimaa* (F), jonka komponentit ovat *pääleikkuuvoima* (F_p), *syöttövoima* (F_s) ja *varsivoima* (F_v). [2]



Kuva 4. Teräkulmat lastuavassa työstössä.

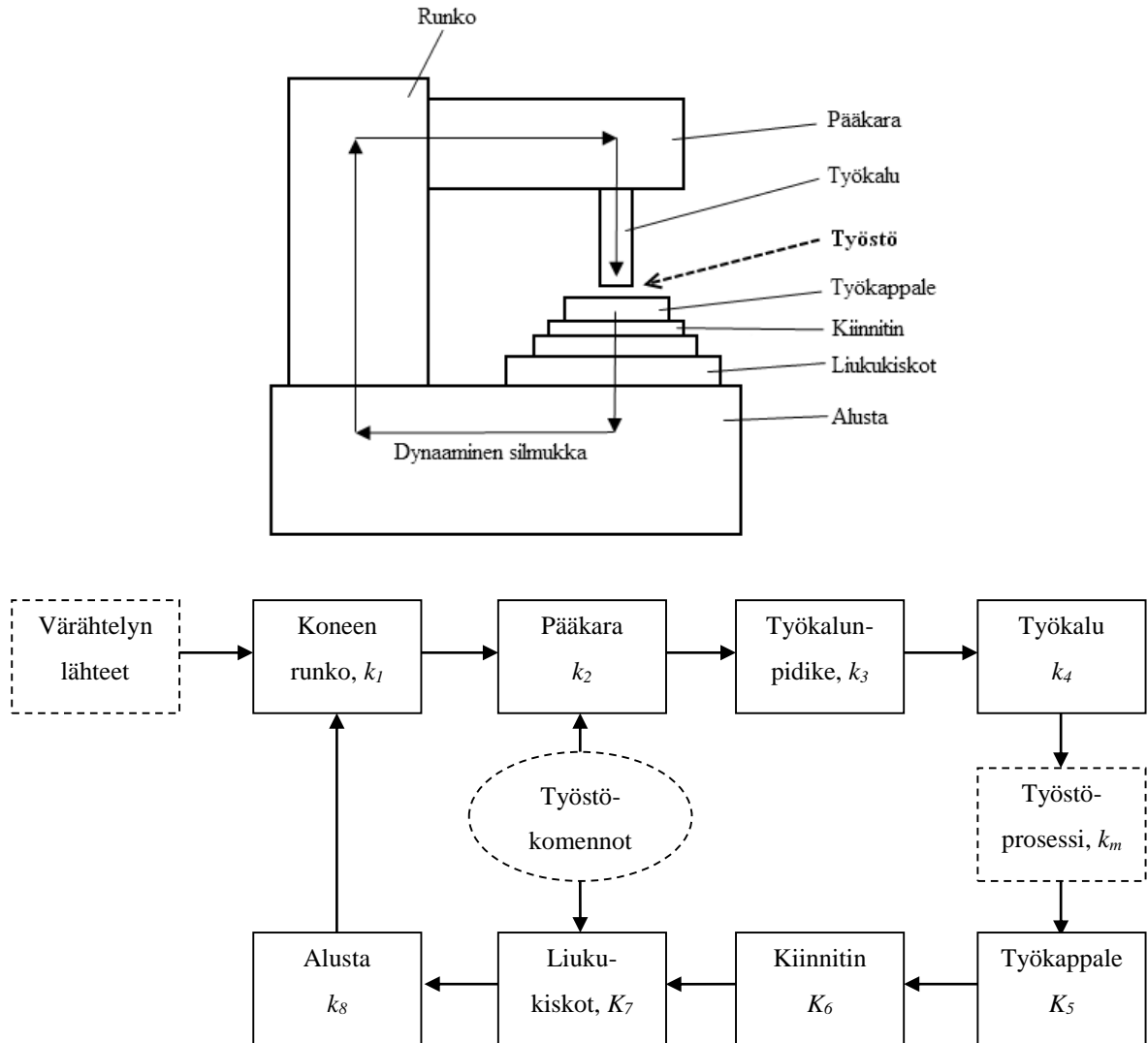


Kuva 5. Leikkuuvoiman komponentit. Mukailleen: [4]

2.2 Lastuamisprosessin stabiilitetti

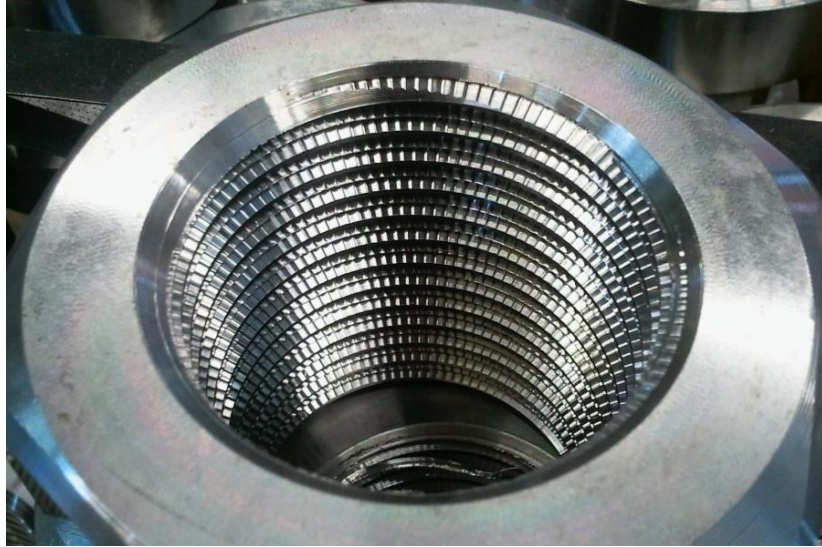
Värähtelyjen välttämismenetelmien ymmärtämiseksi tulee ensin ymmärtää työstöprosessin stabiilitetin määritelmä. Lisäksi on tärkeää osata erottaa työstövärähtelyt muista lastuavassa työstössä esiintyvistä värähtelytyypeistä sekä ymmärtää kaikkien värähtelytyyppien alkuperä ja luonne. Tässä osiossa syvennyttään järjestelmän stabiilitettiin ja siihen vaikuttaviin tekijöihin.

Järjestelmän tai sen yksittäisen elementin *jäykkyys* voidaan määritellä sen kyvyksi vastustaa deformaatiota, kun siihen vaikuttaa jonkinlainen kuormitus. Täten, *staattinen jäykkyys* voidaan määritellä kyvyksi vastustaa deformaatiota staattisen kuorman alaisena ja *dynaaminen jäykkyys* jatkuvasti muuttuvan dynaamisen kuorman alaisena. Dynaaminen jäykkyys siis sisältää myös vaimennuksen, ja se on värähtelyjen kannalta järjestelmän kriittisin ominaisuus. Vaikka yksittäisten työstökoneen komponenttien dynaaminen jäykkyys on tärkeää, ratkaisee koko työstökonejärjestelmän yhdistetty jäykkyys lopullisen työstötarkkuuden. Työstöjärjestelmän dynamiikkaa voidaankin kuvata kuvan 6 mukaisena suljettuna dynaamisena silmukana, jossa ovat vuorovaikutuksessa työstöprosessi ja työstökoneen rakenteellinen dynamiikka. [5]

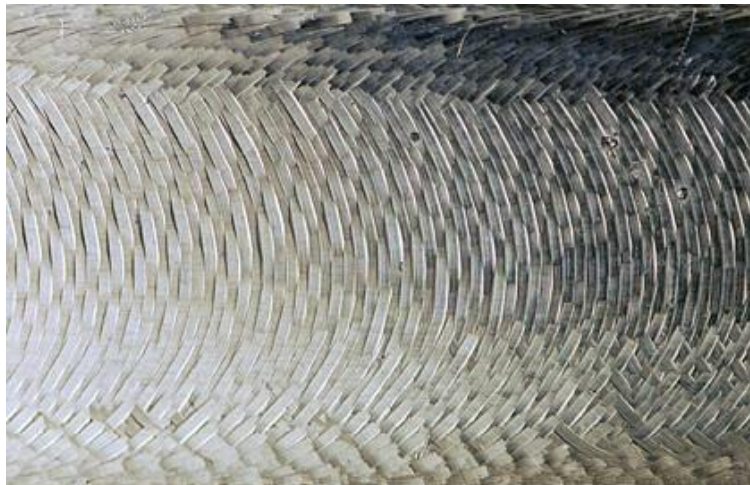


Kuva 6. Esimerkki pystyjiyrsimen (ks. kuva 3) dynamiikkaa kuvaavasta dynaamisesta silmukasta. [5]

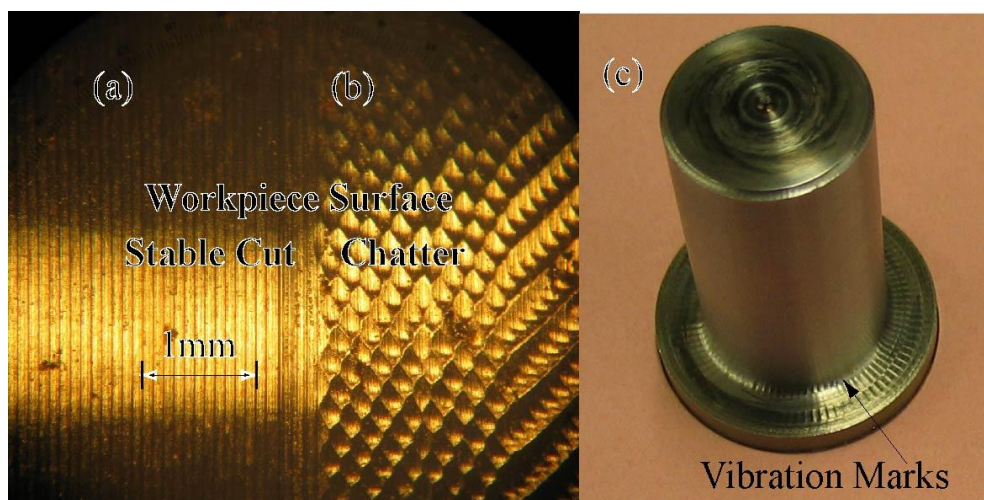
Koska työstöprosessista ei voida täysin eliminoida värähtelyjä aiheuttavia herätteitä, täysin värähtelyistä vapaan lastuamisprosessin aikaansaaminen vaatisi työstöjärjestelmältä äärettömän suurta dynaamista jäykkyyttä. Tätä ei tietenkään ole mahdollista todellisuudessa saavuttaa, joten lastuavissa työstöprosesseissa työkalu värähtelee aina jonkin verran työkappaleeseen nähden. Prosessin muuttuminen epästabiiliksi ja värähtelyjen kasvaminen liian suuriksi voi johtaa lukuisiin erilaisiin haittavaikutuksiin. Haitat saattavat olla lopputuotteen laadun kannalta erittäin merkittäviä, kuten kuvista 7, 8 ja 9 voidaan havaita.



Kuva 7. Esimerkki epästabiilin työstön aikaansaamasta pinnasta sisäpuolisen kierteen sorvauksessa.



Kuva 8. Esimerkki epästabiilin työstön aikaansaamasta pinnasta jyrsinnässä. [6]



Kuva 9. Vasemmalla mikroskooppikuva työkappaleen pinnasta, jossa työstöprosessi on ollut alueella (a) stabiili ja alueella (b) epästabiili. Oikealla kuvassa (c) paljain silmin näkyviä värähtelyjälkiä. [7]

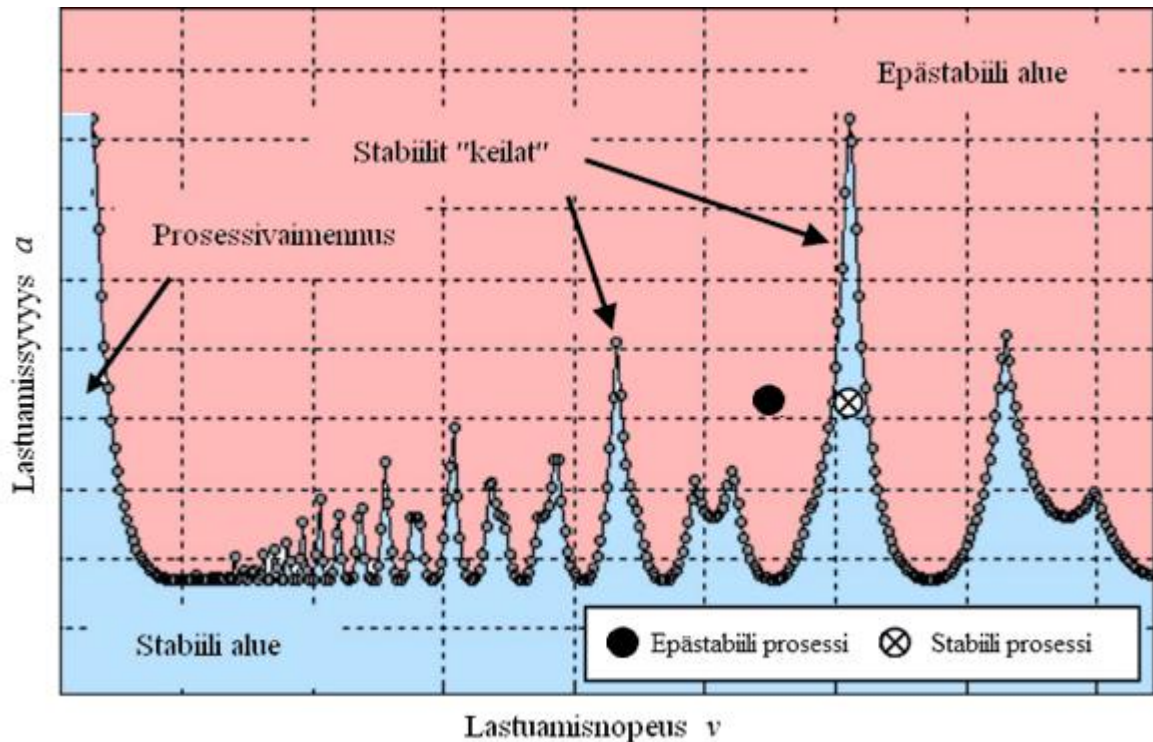
Quintanan ja Ciuranan [1] mukaan työstöväärähtelyjen haittavaikutuksiin kuuluvat mm.:

- huono pinnanlaatu
- kelvoton mittatarkkuus
- liiallinen melu
- suhteettoman suuri lastuamisterän kuluminen
- terä-, työkalu- ja laitevauriot
- alentunut materiaalin poistonopeus
- tuotantoajan piteneminen
- materiaali- ja energiahukka (sekä näiden ympäristövaikutus)
- kelvottoman lopputuotteen jälleenkäsittely- tai jätteenkäsittelykustannukset.

Työstöprosessin *stabiliteetti* on hyvin keskeinen käsite työstöväärähtelyjen välttämiseen tähtäävässä tutkimuksessa. Yksinkertaistetusti stabiili työstöprosessi voidaan mieltää sellaiseksi, jossa työstöväärähtelyjä ei ilmene. Koska prosessissa kuitenkin aina esiintyy jonkin verran jonkin tyyppisiä värähtelyjä, työstöprosessin stabiliteetti on syytä määritellä tarkemmin.

Stabiliteetin määritelmässä voidaan käyttää kriteerinä värähtelyamplitudin muutosta ajan suhteen, jolloin saadaan määritelmät järjestelmän stabiilille, kriittisesti stabiilille ja epästabiilille tilalle. Kun prosessi on kriittisesti stabiili, värähtelyamplitudi ei kasva eikä pienene, vaan säilyy vakiona. Stabiilissa järjestelmässä värähtelyjen amplitudi pienenee kierros kierrokselta kohti nollaa, kun taas epästabiilissa järjestelmässä se kasvaa kunnes saavuttaa uuden kriittisesti stabiilin tilan järjestelmän parametrien muututtua riittävästi. Prosessin stabiliteetin määrää siis järjestelmän värähtelyjen vaimenevuus. [8]

Kuten myöhemmin esitetään, lastuamisprosesseissa esiintyvistä värähtelyn syntymekanismeista monia voidaan ehkäistä valitsemalla oikeat työstöarvot. Tässä auttaa *stabiliteettikuvaaja* eli SLD (stability lobe diagram). Stabiliteettikuvaaja kuvaa stabiilin ja epästabiilin työstöprosessin rajaa lastuamisnopeus-lastuamissyvyys-koordinaatistossa (ks. kuva 10). Se on siis käyrä, joka ilmoittaa kriittisesti stabiilin aksiaalisen lastuamissyvyyden lastuamisnopeuden funktiona. Lastun leveydellä eli syötöllä s on hyvin vähän, jos lainkaan, vaikutusta prosessin stabiliteettiin [9]. Järjestelmän stabiliteettikuvaajan selvittämisen menetelmiin syvennyttään luvussa 3.



Kuva 10. Stabiiliteettikuvaaja. Mukailleen: [1]

Kuvassa 10 on selvästi havaittavissa jaksottainen ilmiö, jonka vaikutuksesta lastuamisnopeuden kasvaessa ”keilan” (lobe) muotoiset stabiilit alueet vuorottelevat epästabiiilien alueiden kanssa lastuamissyvyuden pysyessä vakiona. Ilmiö johtuu työstöprosessin värähtelylajeista tärkeimmän eli regeneratiivisen värähtelyn luonteesta (ks. 2.3.1). Kuvasta voidaan myös havaita, että tarpeeksi alhaisella lastuamissyvyydellä prosessi on aina stabiili. Niin kutsuttu *prosessivaimennus* (process damping) taas tekee prosessista stabiilin alhaisen lastuamisnopeuden alueella. Prosessivaimennus selitetään tarkemmin luvussa 2.4.

2.3 Värähtelyjen luokittelu

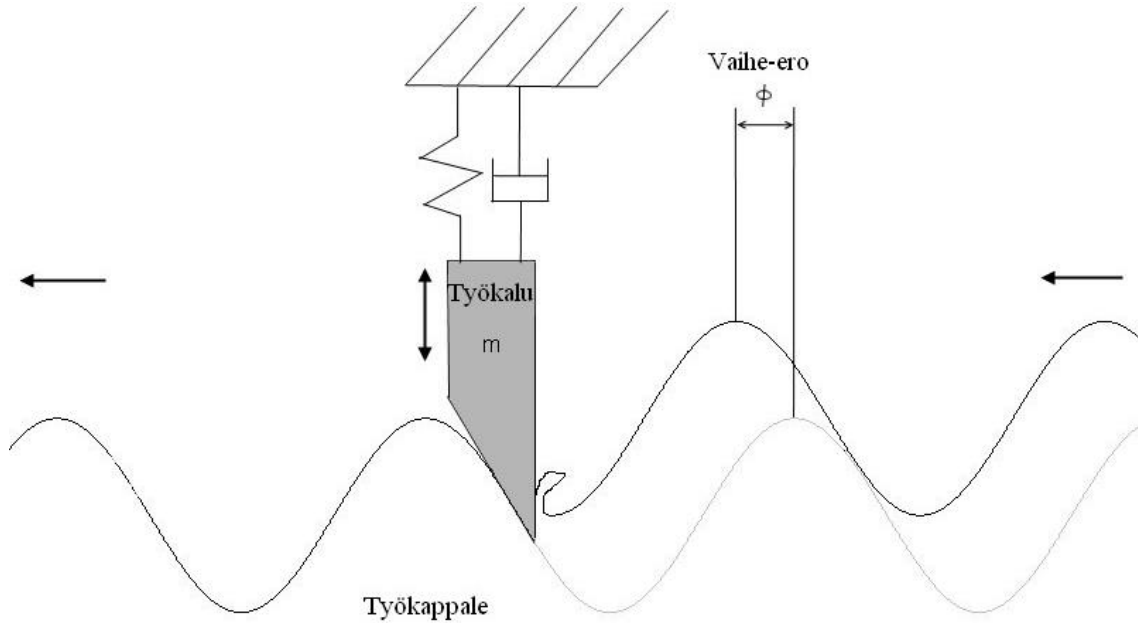
Työstöprosessin epästabiiiliuden lähteet voidaan luokitella monin eri tavoin. Cheng ja Huo [5] luokittelevat värähtelyt niiden värähtelyenergian lähteen perusteella, jolloin saadaan kolme pääalajia: *työstövärähtelyt*, *vapaat värähtelyt* ja *pakkovärähtelyt*.

2.3.1 Työstövärähtelyt

Työstövärähtelyjen heräte ja värähtelyenergia eivät tule työstöprosessin ulkopuolelta vaan työkalun ja työkappaleen interaktiosta työstön aikana. Ne ovat *itseherätteisiä* värähtelyjä, mikä tarkoittaa sitä että niiden herätteenä toimii jatkuva jaksollinen voima joka moduloidaan värähtelyksi yhdellä järjestelmän ominaistuuksista. [3][9] Koska nämä värähtelyt ovat kaikista lastuavassa työstössä esiintyvistä värähtelyistä epätoivottavimpia ja vähiten hallittavissa, suurin osa alan nykyisestä tutkimuksesta kohdistuu nimenomaan tähän värähtelytyyppiin. Työstövärähtelyt voidaan jakaa kahteen kategoriaan: *primäärisiin* ja *sekundäärisiin*. [1][10]

Primääriset eli ei-regeneratiiviset työstövärähtelyt aiheutuvat itsestään työstöprosessista, jossa on useita erilaisia värähtelyjä aiheuttavia mekanismeja. *Kitkavärähtelyt* ovat nimensä mukaisesti värähtelyjä, jotka aiheuttaa kitka työkalun pintojen ja työstettävän materiaalin välillä. Tätä voidaan vähentää valitsemalla työkalun rinta- ja päästökulmat oikein [5]. *Muotokytkevärähtelyjä* (mode coupling chatter) esiintyy, jos värähtely pääleikkuuvoiman suunnassa aiheuttaa värähtelyn myös varsivoiman suunnassa, ja päinvastoin [10]. Niillä on monia syitä kuten kitka, lastunpaksuuden vaihtelu, leikkauskulman oskillaatio ja regeneraatioilmiö [5]. Niitä voidaan välttää oikein valituilla työkalun radalla ja työstöarvoilla. Primääriseen kategoriaan voidaan lukea myös *termomekaaniset* värähtelyt, jotka aiheutuvat lämpötilan ja plastisen deformaatioalueen muodonmuutosnopeuden vaikutuksesta lastunmuodotukseen [11].

Sekundääriset värähtelyt tunnetaan myös nimellä *regeneratiiviset* värähtelyt (regenerative chatter). Regeneratiiviset värähtelyt syntyvät yleisimmissä lastuavissa prosesseissa lähes aina esiintyvistä leikkausten päällekkäisyydestä. Kuten aiemmin mainittiin, lastuamisterä värähtelee aina (vapaista ja pakkovärähtelyistä johtuen) jonkin verran työkappaleen pintaan nähden. Tästä seuraa, että sen rata ja siten myös sen aikaansaama pinta on aina jonkin verran aaltomainen. Regeneratiivista värähtelyä syntyy, kun peräkkäisten samassa kohdassa tapahtuvien leikkausten aaltomuodot eivät satu kohdakkain (ks. kuva 11). [3]



Kuva 11. Liioteltu periaatekuva regeneratiivisen värähtelyn syntymekanismista. Tässä työkalu esitetään yhden vapausasteen vapaana värähtelijänä.

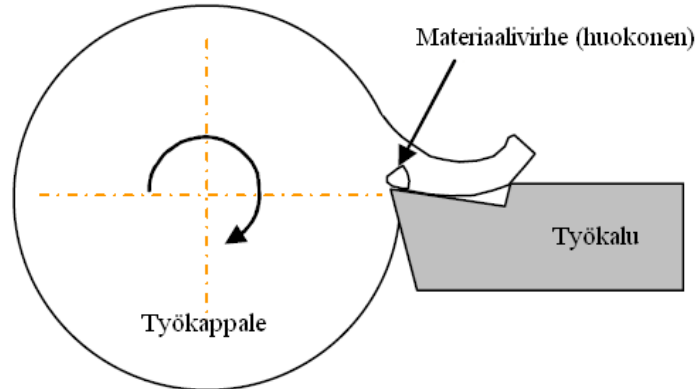
Regeneratiivinen värähtely siis syntyy lastuamisvoiman F vaihtelusta, joka puolestaan syntyy aaltomuotojen vaihe-eron ϕ aiheuttamasta lastun paksuuden vaihtelusta. Vaihe-ero ϕ on suoraan verrannollinen lastuamisnopeuteen v , ja lastuamisvoimaan vaikuttaa myös lastuamissyvyys. Näin saadaan regeneratiiviselle värähtelylle kaksi päämuuttujaa: lastuamissyvyys ja lastuamisnopeus. Lastun paksuuden vaihtelu on suurimmillaan aaltomuotojen ollessa vastakkaisessa vaiheessa ja pienimmillään niiden ollessa samassa vaiheessa. Tästä johtuen vaihtelu suurenee ja pienenee jaksollisesti lastuamisnopeuden kasvaessa. Tämä selittää stabiliteettikuvaajassa esiintyvän jaksollisen ilmiön, josta kuvaaja on saanut englanninkielisen nimensä (ks. kuva 10). [3]

Koska regeneratiivinen värähtely on itseään ruokkiva ilmiö, sen vahvistus nousee huonosti valituilla työstöarvoilla helposti suureksi. Tästä seuraa, että regeneratiivisen värähtelyn esiintymisellä on erittäin suuri vaikutus lastuamisprosessin stabiliteettiin. Regeneratiivista värähtelyä pidetäänkin yleisesti sekä työstövärähtelyjen että koko työstöprosessin värähtelyjen tärkeimpänä mekanismina [1][10]. Sen välttämismenetelmiin syvennytään kohdassa 2.4.

2.3.2 Vapaat värähtelyt

Vapaat värähtelyt ovat värähtelyjä, jotka syntyvät kun mekaaninen järjestelmä poikkeutetaan tasapainoasemastaan (heräte) ja päästetään värähtelemään vapaasti. Värähtely tapahtuu yhdellä järjestelmän ominaistajuuksista ja jatkuu kunnes järjestelmän vaimennus tappaa sen. Lastuamisprosesseissa vapaat värähtelyt saavat herätteensä erilaisista virheistä ja häiriöistä työstöprosessin aikana, mistä johtuen ne ovat luonteeltaan satunnaisia.

Työkaluriippuvaisten värähtelyjen herätteenä toimivat lastuamisterän kulumista, rikkoumista yms. aiheutuvat voimapulssit. Ne riippuvat työkalun tyypin ja materiaalin lisäksi työstöarvoista: liian suurilla arvoilla lastuaminen rikkoo työkalun, mutta toisaalta liian alhaisilla arvoilla voi ilmetä *irtosärmää* eli työkappaleesta irtoavien osien hitsautumista terään kiinni. Työkaluriippuvaisten värähtelyjen vastaparin eli *työkappaleriippuvaisten* värähtelyjen herätteet taas tulevat lastuttavasta materiaalista: materiaali- virheistä (ks. kuva 12), muokauslujittumisesta/pehmenemisestä jne. Molempien värähtelytyyppien ehkäisemisessä auttaa oikean, korkealuokkaisen työkalun ja oikeiden työstöarvojen valitseminen. [2][5]



Kuva 12. Työkappaleriippuvaisen värähtelyn syntymekanismi sorvauksessa. Mukailten: [5]

Ympäristöriippuvaiset värähtelyt ovat järjestelmän ulkopuolisen ympäristön häiriöiden aiheuttamia. Jos työstökoneen ympäristö johtaa hyvin värähtelyjä, ainoa estämiskeino voi olla lastuamisjärjestelmän eristäminen ympäristöstä [5]. Tämä voidaan toteuttaa esim. vaimentamalla työstökoneen jalustan kiinnitys tähän suunnitelluilla värähtelyeristimillä (ks. kuva 13). Ympäristöriippuvaiset värähtelyt voidaan näkökannasta riippuen mieltää myös pakko- värähtelyiksi, jos ympäristöstä järjestelmään johtuva herätevoima on harmoninen, esim. toisesta työpajan pyörivästä laitteesta aiheutuva. [1]



Kuva 13. Työpajan laitteille suunniteltu värähtelyeristin: Trelleborg Novibra® TFT™. [12]

2.3.3 Pakkovärähtelyt

Pakkovärähtelyjen energianlähde on lastuamisprosessin ulkopuolinen jatkuva jaksollinen heräte, joka saa työstöjärjestelmässä aikaan saman taajuisen värähtelyn. Se aiheutuu usein jonkin työstökoneen sisäisen tai ulkoisen komponentin epätasapainosta. Esim. epätasapainossa oleva sorvin kara aiheuttaa pyöriessään jaksollisen kuormituksen. Epätasapainosta johtuva pakkovärähtely voidaan tietenkin välttää työstökoneen komponenttien mahdollisimman tarkalla tasapainotuksella. [5] Toinen pakkovärähtelyä aiheuttava mekanismi on jyr-sinnässä esiintyvä työstön epäjatkuvuus, jossa leikkaava terä vuoroin on ja vuoroin ei ole kontaktissa työstettävän materiaalin kanssa. [1]

2.3.4 Yhteenveto värähtelyistä

Taulukossa 1 esitetään yhteenveto lastuamisprosessin värähtelylajeista. Taulukko ei sisällä termomekaanista värähtelyä, koska se ei esiinny Chengin ja Huon [5] teoksessa.

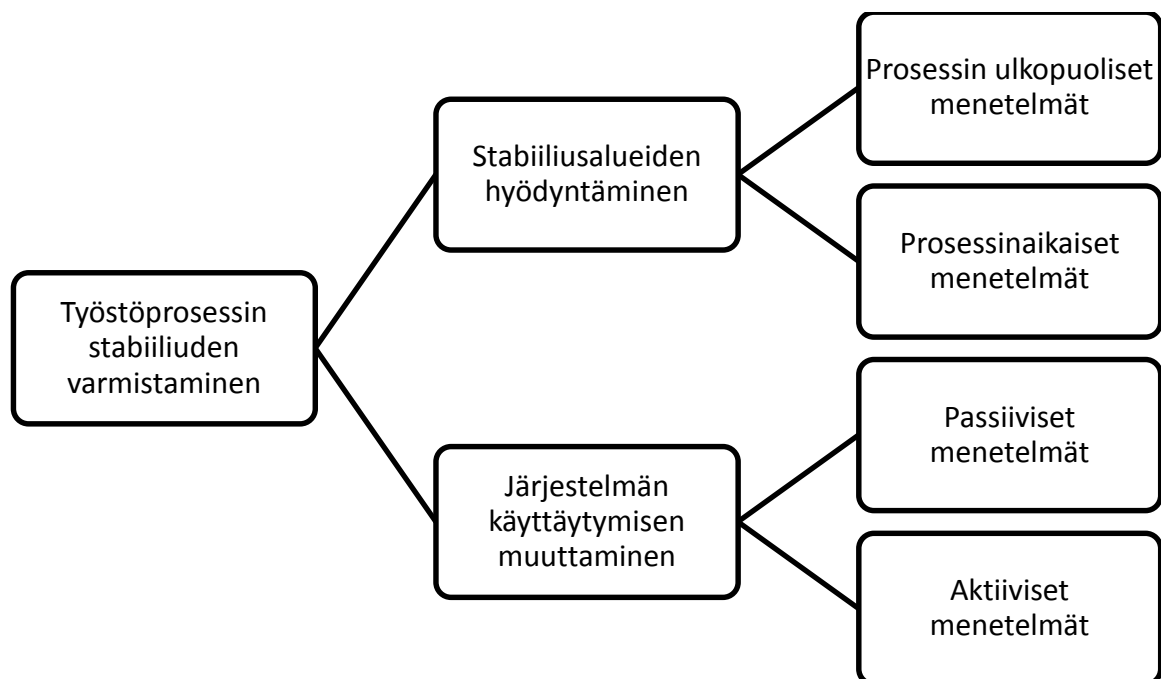
Taulukko 1. Lastuamisprosessin värähtelyt: yhteenveto. Mukailten: [5]

		Lastuamisprosessin värähtelyt				Vapaat värähtelyt		Pakkovärähtelyt
		Työstövärähtelyt		Muutokytkeitä		Työkalaruippuvainen		Ympäristöriippuvainen
	<i>Regeneratiivinen (dominoiva)</i>	Kiika		Muotokytkentä	Työkalaruippuvainen		Ympäristöriippuvainen	Työstökoneen komponenteista riippuvainen
Sijainti	Lastuavan särmän ja työkappaleen välissä.	Päästöpinta – työkappale, lastu – rintapinta.		Leikkuuvoiman komponenttien suunnissa.	Päästöpinta – työkappale, lastu – rintapinta.		Koko työstöprosessi.	Koko työstöprosessi.
Syyt	Leikkausten päällekkäisyys.	Kiika päästö- ja rintapinnalla.		Kiika päästö- ja rintapinnalla, lastunpaksuuden vaihtelu, leikkauskulman osillaatio.	Työkalan kuluminen ja rikkoutuminen, irtosärmä jne.		Ympäristön häiriöt.	Liikkuvien komponenttien kuten sorvin karan epätasapaino.
Piirteet	Itseherätteinen värähtely; jättää altomaisen pinnan työkappaleeseen.	Itseherätteinen värähtely; amplitudi riippuu järjestelmän vaimennuksesta.		Muotokytkentävä- rähately; samanaikainen värähtely kahden suuntaan.	Satunnainen ja kaoottinen; riippuu työolosuhteista.		Satunnainen ja kaoottinen; riippuu työympäristöstä.	Pakkovärähtely.
Välttämiskeino	(<i>Oikeiden työstöarvojen valinta stabiilititeetikuvaajan mukaan.</i>) Ks. kohta 2.4.	Oikean päästö- ja rintakulman valinta.		Työkalan radan muuttaminen, <i>oikeiden työstöarvojen valinta.</i>	Korkealuokkaisen työkalamateriaalien sekä <i>oikeiden työstöarvojen valinta.</i>		Tarpeen vaatiessa työstökoneen eristämisen värähtelyiltä.	Liikkuvien komponenttien tarkka tasapainotus.

2.4 Työstöväärähtelyjen välttäminen

Työstöväärähtelyt voidaan yleensä välttää käyttämällä alhaista lastuamissyvyyttä tai -nopeutta. Alhaisella lastuamisnopeudella vaikuttaa prosessin värähtelyjä vaimentava ilmiö nimeltä *prosessivaimennus* (process damping). Ilmiö johtuu regeneratiivisten värähtelyjen tavoin työstetyn pinnan aaltomuodosta. Värähtelyjen pintaan jättämä aaltomuoto on alhaisella lastuamisnopeudella lyhytaaltainen eli jyrkkänousuinen, mikä aiheuttaa työkalun päästöpinnaan vaikuttavaan voimaan suhteellisen suuren vaihtelun. Tämän vaihtelun vaihe-ero työvoiman vaihteluun nähden vaimentaa työstöväärähtelyjä. [9]

Alhaisten työstöarvojen käyttö ei kuitenkaan usein ole kannattavaa tuottavuuden vaatimusten vuoksi. Prosessin stabiiliuden varmistamiseksi suuremmalla työstönopeudella ja -syvyydellä onkin kehitetty erilaisia menetelmiä. Quintana ja Ciurana [1] jakavat työstöväärähtelyjen välttämiseen tähtäävän tutkimuksen kahteen päätutkimuslinjaan: *stabiiliusalueita hyödyntäviin ja järjestelmän käyttäytymistä muuttaviin* menetelmiin. Ensimmäinen ryhmä perustuu työstöparametrien valitsemiseen SLD:n stabiililta alueelta ja jakautuu edelleen *prosessin ulkopuolisiin* sekä *prosessinaikaisiin* menetelmiin. Jälkimmäinen ryhmä perustuu SLD:n stabiiliusrajan siirtämiseen järjestelmän käyttäytymistä muokkaamalla ja jakautuu *passiivisiin* sekä *aktiivisiin* menetelmiin. Kuva 14 havainnollistaa jakoa.



Kuva 14. Työstöväärähtelyihin keskittyvän tutkimuksen päälinjat. Mukailleen: [1]

2.4.1 Prosessin ulkopuoliset menetelmät

Prosessin ulkopuoliset menetelmät pyrkivät välttämään työstöväärähtelyt valitsemalla optimaaliset työstöarvot stabiliteettikuvaajan stabiililta alueelta. Tämä tarkoittaa sitä, että korkeampien työstöarvojen valitsemista varten täytyy järjestelmän stabiliteettikuvaajan olla tunnettu kokonaan tai vähintään käytetyllä nopeusalueella. Stabiiliuskuvaajan selvittämiseen on kehitetty erilaisia metodeja kuten järjestelmän dynamiikan matemaattinen mallinnus ja empiiriset kokeet. Luku 3 syventyy näihin metodeihin tarkemmin.

Prosessin ulkopuolisilla menetelmillä on kaksi suurta etua muihin menetelmiin verrattuna. Ensimmäinen on se, että niin kauan kuin järjestelmän dynamiikka tunnetaan, on menetelmiä mahdollista käyttää missä tahansa järjestelmässä ilman lisäanturointeja tai muita ylimääräisiä elementtejä. On kuitenkin huomioitava, että jos järjestelmän väärähtelykäyttäytymistä ei tunneta, käyttäytymisen selvittäminen saattaa vaatia erinäisiä lisälaitteita (ks. kohta 3.1.1). Menetelmien toinen etu on niiden ennakoiva luonne: tarkasti lasketun stabiliteettikuvaajan avulla voidaan varmistaa, että työstöprosessi ei missään vaiheessa käy epästabiililla alueella. [1]

Menetelmillä on kuitenkin myös erinäisiä ongelmia. Ensimmäinen ongelma on itse stabiliteettikuvaajan määrittäminen, johon syvennytään tarkemmin luvussa 3. Toinen ongelma on se, että stabiliteettikuvaajan käyttöalue on varsin rajattu: ratkaistu SLD on käypä vain yhdelle järjestelmän konfiguraatiolle. Saatu kuvaaja on siis hyödytön, jos yksikin seuraavista muuttuu: työstökone, kara, työkalu tai työkalunpidike. Jopa työkalun vapaapituuden muutoksella on suuri vaikutus stabiliteettiin. Lisäksi joissain tilanteissa, kuten ohutseinämäisiä tuotteita työstettäessä, järjestelmän stabiliteettikuvaaja voi jatkuvasti muuttua työstön edetessä. Tämä johtuu työkappaleen dynaamisen jäykkyyden suuresta suhteellisesta muutoksesta. Tällaisessa tilanteessa stabiilin työstöprosessin varmistaminen ratkaisemalla stabiliteettikuvaaja etukäteen voi olla hyvin vaikeaa. [1]

2.4.2 Prosessinaikaiset menetelmät

Prosessinaikaiset menetelmät perustuvat työstöväärähtelyjen tunnistamiseen työstön aikana ja työstöarvojen muokkaamiseen niiden eliminoimiseksi. Työstöväärähtelyjen tunnistaminen toteutetaan valvomalla jatkuvasti anturien avulla esim. prosessin värähtelyjä, prosessista kuuluvaa ääntä tai sen kuluttamaa tehoa. Prosessinaikaisten menetelmien suurin etu prosessin ulkopuolisiin menetelmiin verrattuna on se, että ne eivät vaadi järjestelmän stabiliteetti-kuvaajan tuntemusta. Tämä mahdollistaa työstön aloittamisen suoraan ilman järjestelmän dynamiikan analysointia. [1]

Prosessinaikaisten menetelmien suurin ongelma on se, että ne reagoivat värähtelyihin vasta niiden jo ilmettyä. Järjestelmä reagoidessa tilanteeseen vahinkoa on jo tapahtunut, mikä on kriittistä etenkin tarkkuutta vaativassa viimeistelytyöstössä. Menetelmien kehitys kuitenkin mahdollistaa aina nopeamman ja nopeamman värähtelyjen tunnistamisen, mikä pienentää ongelmaa. Menetelmien toinen ongelma kuitenkin on, että niiden käyttö vaatii sopivan anturoinnin työstökoneen runkoon (saatava lähelle prosessia, ei aina mahdollista jälkiasennuksena) sekä ”älykkään” säätimen (yleensä työstökoneesta erillinen tietokone). Prosessinaikaisista menetelmistä on kuitenkin jo markkinoilla kaupallisia ratkaisuja, joissa anturointi ja säädin on valmiiksi integroitu CNC-koneeseen. [1]

2.4.3 Passiiviset menetelmät

Passiiviset menetelmät perustuvat järjestelmän stabiiliusalueiden laajentamiseen siihen asennettavilla passiivisilla komponenteilla. [1] Toisin sanottuna menetelmien tavoitteena on järjestelmän dynaamisen jäykkyyden parantaminen sen rakennetta muuttamalla.

Järjestelmän dynaamista jäykkyyttä voidaan passiivisesti parantaa työstökoneen ja työkalun rakennetta optimoimalla. Esimerkiksi jyrsimiin on saatavilla erikoistyökaluja, joiden teräkulma ei ole vakio koko työkalun pituudella. Tämä on keino parantaa työkalun vaimennusta. Toinen tapa parantaa dynaamista jäykkyyttä on asentaa järjestelmään ylimääräisiä elementtejä, jotka absorboivat värähtelyenergiaa tai häiritsevät värähtelyn syntymekanismia. Esimerkkejä näistä elementeistä ovat erilaiset värähtelyvaimentimet. Markkinoilta on saatavilla työkaluja ja työstökoneita, jotka sisältävät näitä vaimentimia. [1]

Passiiviset menetelmät ovatkin suurilta osin sidoksissa työstökoneiden ja työkalujen rakenteelliseen suunnitteluun. Niiden toteuttaminen on siis laitevalmistajien vastuulla. Tästä seuraa se etu, että menetelmien käyttö ei vaadi laitteen hankinnan jälkeen juurikaan toimenpiteitä laitteen käyttäjältä. Tilanteen haittapuolia ovat jälkiasennuksen vaikeus ja se, että menetelmien toteutustavoista saattaa olla liikkeellä varsin vähän tietoa, koska ne liittyvät niin läheisesti työstökoneiden sisäiseen rakenteeseen ja täten laitevalmistajan liikesalaisuuksiin.

2.4.4 Aktiiviset menetelmät

Aktiiviset menetelmät perustuvat järjestelmän tilan jatkuvaan automaattiseen valvontaan. Niille on luonteenomaista järjestelmän kyky tunnistaa ongelmatilanteet ja automaattisesti sekä tehdä päätöksiä että toteuttaa toimenpiteitä tilanteen korjaamiseksi. Siinä missä prosessinaikaiset stabiiliusalueita hyödyntävät menetelmät rajoittuvat työstöarvojen muuttamiseen ongelman esiintyessä, aktiiviset menetelmät pystyvät esim. moduloimaan työn määrää, absorboimaan energiaa järjestelmästä tai luovuttamaan sitä järjestelmään värähtelyjen syntymekanismien häiritsemiseksi. [1]

Aktiivisia menetelmiä toteuttavat järjestelmät koostuvat valvontaelementeistä (anturit), diagnoosielementeistä (säädin) ja toimeenpanoelementeistä (toimilaitteet). Toimeenpanovaiheessa käytettäviä toimilaitteita voivat olla menetelmästä riippuen esim. aktiiviset laakerit tai pietsosähköiset toimilaitteet. Aktiivisiin menetelmiin kuuluu myös vaaputus eli SSV (spindle speed variation), jossa värähtelyjen syntymekanismeja häiritään muuttamalla karan pyörimisnopeutta jatkuvasti ajan funktiona. [1]

Aktiivisten menetelmien suurimpia ongelmia ovat menetelmien toteuttamiseen vaadittavien komponenttien hankintakustannukset. Toinen ongelma on se, että aktiiviset menetelmät ovat vielä varsin nuori tutkimuslinja: kaupallisia tai työstökoneisiin integroituja ratkaisuja ei vielä välttämättä löydy. Menetelmien tutkimus on kuitenkin jatkuvaa, ja siihen ovat lähivuosina vaikuttaneet edistysaskeleet antureissa, säätölaitteissa sekä toimilaitteissa.

2.4.5 Yhteenveto välttämismenetelmistä

Taulukossa 2 esitetään yhteenveto työstövärähtelyjen välttämismenetelmistä sekä niiden eduista ja haitoista.

Taulukko 2. Työstöväärähtelyjen välttämismenetelmät: yhteenveto.

Työstöväärähtelyjen välttämismenetelmät		
Stabiiliusalueita hyödyntävät menetelmät	Prosessinaikaiset menetelmät	Järjestelmän käyttäytymistä muuttavat menetelmät
<p><i>Prosessin ulkopuoliset menetelmät</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Perustuvat optimaalisten työstöarvojen valintaan etukäteen. • Järjestelmän värähtelykäyttäytyminen (stabiiliteettikuvaaja) tunnettava. • Eivät välttämättä vaadi lisäelementtejä (esim. antureita) työstökoneeseen. • Stabiiliteettikuvaajan käyttöalue hyvin rajattu. • Joissain tilanteissa stabiiliteettikuvaaja muuttuu työstön edetessä; ei etukäteen analysoitavissa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Perustuvat lastuamisarvojen optimointiin prosessin aikana. • Työstöväärähtely tunnistetaan anturien avulla (ääni, värähtely, teho tms.). • Eivät vaadi tarkkaa tietoa järjestelmän värähtelykäyttäytymisestä. • Reagoivat värähtelyyn vasta sen ilmettyä. • Vaativat anturoiminnan työstökoneen rungossa sekä ”älykkään” säätimen. 	<p><i>Passiiviset menetelmät</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Perustuvat järjestelmän stabiiliusalueiden laajentamiseen passiivisin keinoin. • Työkalun dynaamisen jäykkyyden parantaminen rakennetta muokkamalla. • Ylimääräiset komponentit, jotka absorboivat värähtelyenergiaa tai häiritsevät värähtelyn syntymekanismeja. • Toteutus yleensä laitevalmistajan käsissä. <p><i>Aktiiviset menetelmät</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Perustuvat järjestelmän tilan jatkuvaan automaattiseen valvontaan. • Järjestelmän kyky diagnosoida ongelmia ja tehdä itse päätöksiä tilanteen parantamiseksi. • Menetelmiä toteuttavat järjestelmät koostuvat valvonta-, diagnoosi- ja toimenpanoelementeistä: investointikustannukset. • Suhteellisen nuori tutkimushaara.

3 VÄRÄHTELYKÄYTTÄYTYMISEN SELVITTÄMINEN

Kuten kohdassa 2.4.1 kerrottiin, prosessin ulkopuolisten stabiiliusalueita hyödyntävien menetelmien käytön edellytyksenä on järjestelmän värähtelykäyttäytymisen selvittäminen. Toisin sanottuna järjestelmän stabiliteettikuvaaja on jotenkin ratkaistava käytetyllä nopeusalueella. Kuvaajan selvittämiseen on kehitetty runsaasti erilaisia metodeja, joista tässä esitellään muutamia. Johdannossa esitetyn rajauksen mukaisesti menetelmien käsittelyssä keskitytään erityisesti matemaattiseen mallintamiseen perustuviin menetelmiin.

3.1 Matemaattiset mallinnusmenetelmät

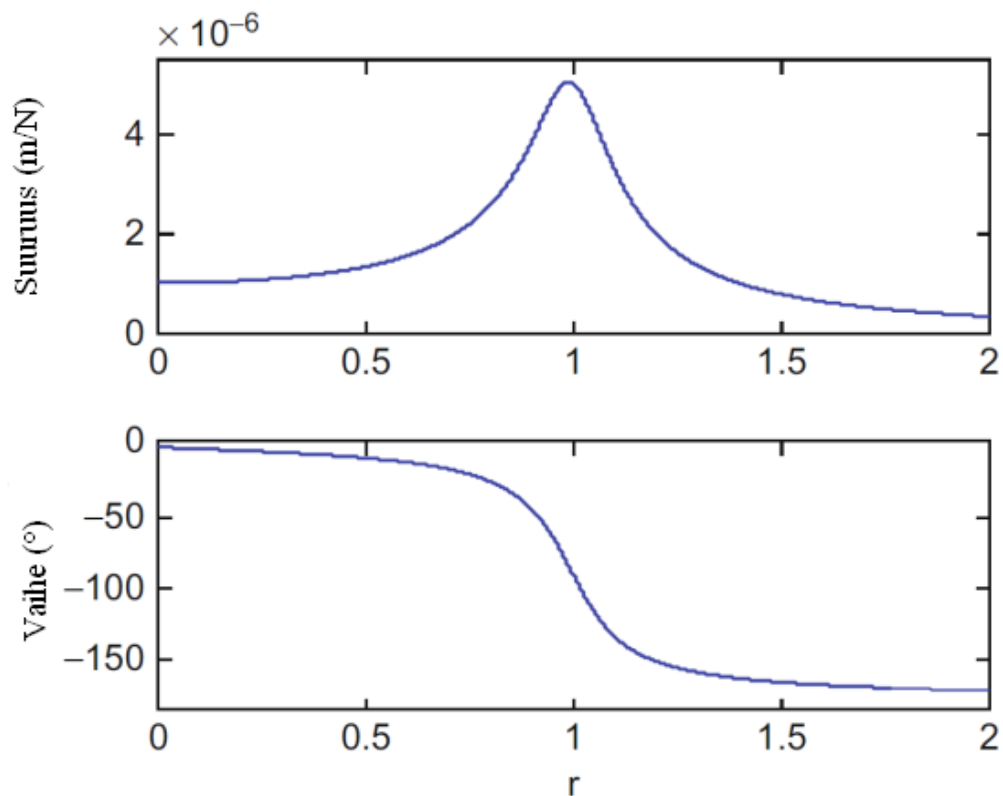
Järjestelmän dynamiikan matemaattinen mallintaminen on usein käytetty ja paljon tutkittu menetelmä järjestelmän stabiliteettikuvaajan määrittämiseksi. Matemaattisessa mallintamisessa fyysisen järjestelmän dynamiikasta kerätyt tiedot yhdistetään työstöprosessista luotuun matemaattiseen malliin. Mallinnusmenetelmien etu muihin värähtelykäyttäytymisen selvittämismenetelmiin verrattuna on niiden ”hajota ja hallitse”-periaate: koska fyysisen työstökoneen värähtelykäyttäytymisestä kerätyt tiedot, työstettävän materiaalin ominaisuudet ja matemaattinen malli ovat kaikki olemassa erillisinä, mikä tahansa näistä mallin osista voidaan vaihtaa toiseen ilman vaikutusta muihin. Tämä siis tarkoittaa, että vaikka stabiliteettikuvaaja on laskettava uudestaan työkappalemateriaalia vaihdettaessa, työstökoneen dynamiikkaa ei tarvitse enää selvittää uudestaan. [1]

Matemaattiseen mallintamiseen perustuvat menetelmät ovat tyypillisesti hyvin monimutkaisia ja muuttuvat koko ajan monimutkaisemmiksi tutkijoiden pyrkiessä tarkempiin malleihin ja ottaessa huomioon lisää lastuamisprosessissa vaikuttavia ilmiöitä. Tämä asettaa korkeat vaatimukset henkilökunnan osaamiselle. Niillä saadut tulokset ovat myös hyvin herkkiä lähtöarvojen (kuten lastuamisvakioiden) virheille. Lisäksi tulosten epätarkkuutta voi aiheuttaa se, että mallintaminen itsessään sisältää jonkin verran yksinkertaistuksia. [1]

Mallinnusmenetelmissä on kaksi päävaihetta. Ensimmäinen on fyysisen järjestelmän värähtelykäyttäytyminen karakterisointi ja toinen stabiliteettikuvaajan ratkaiseminen edellisen vaiheen tuloksesta matemaattisen mallin kaavojen avulla. [3]

3.1.1 Värähtelykäyttäytymisen karakterisointi

Järjestelmän värähtelyvasteen karakterisointiin kuuluu kaksi osa-aluetta: työstökoneen ja työkappalemateriaalin vaikutuksen selvittäminen. Työstökoneen vaikutus värähtelyvasteeseen karakterisoidaan selvittämällä sen *taajuusvastefunktio* eli FRF (frequency response function). Taajuusvastefunktio kuvaa järjestelmän värähtelyn suhdetta siihen syötettyyn harmoniseen (pakko)herätteeseen. Sama funktio voidaan esittää monessa eri muodossa. Eräs esitystavoista on kuvan 15 suuruus-vaihe-esitys. [3]



Kuva 15. Yhden vapausasteen järjestelmän taajuusvastefunktio suuruus-vaihe-esityksenä. Mukailleen: [3]

Yleinen menetelmä järjestelmän taajuusvastefunktion selvittämiseen on kokeellinen moodi-analyysi. Koejärjestelyyn vaaditaan

- mekanismi halutun herätevoiman syöttämiseksi halutulla taajuusalueella
- anturit järjestelmän värähtelyjen mittaamiseksi halutulla taajuusalueella
- dynaamisen signaalin käsittelyyn kykenevä laite herätevoimasignaalin ja järjestelmästä mitatun värähtelysignaalin muuntamiseen taajuusvastefunktioksi.

Signaalinkäsittelylaite muuntaa aikatazon värähtely- ja voimasignaalit Fourier-muunnoksen avulla taajuustasoon. Taajuusvastefunktio saadaan taajuustason signaalien keskinäisestä suhteesta. Herätevoiman syöttämiseen käytetään usein kimmovasaraa, joka aiheuttaa herätteen laajalla taajuuskaistalla. Siihen voidaan kuitenkin käyttää myös esim. sähkömagneettisia ja sähköhydraulisia tärstimä, joilla saadaan aikaan satunnaisempi heräte. Antureina taas voidaan käyttää esim. siirtymä-, nopeus- tai kiihtyvyyssantureita. Etenkin kiihtyvyyssantureita käytetään kokeissa usein, mutta joissain tapauksissa kiihtyvyyssanturin massa (vaikka pieni onkin) voi aiheuttaa merkittävän muutoksen työkalun dynamiikassa ja vääristää tuloksia. Tällöin voidaan joutua käyttämään kosketuksetonta anturia, kuten esim. laseranturia. [1][3]

Toinen menetelmä elementtien dynamiikan arviointiin on FE-analyysi. FE-menetelmillä järjestelmän stabiliteettia voidaan ennakoida ja optimoida jo suunnitteluvaiheessa, mikä säästää laitteen valmistajan rahaa ja aikaa [1]. Laitteen käyttäjälle ko. menetelmien käyttö on kuitenkin lähes mahdotonta ilman laitteen valmistajalta saatua valmista FE-mallia.

Kolmas keino taajuusvastefunktion selvittämiseksi on reseptanssikytkentäalirakenneanalyysi eli RCSA (receptance coupling substructure analysis). Menetelmä mahdollistaa yksittäisten järjestelmän komponenttien (työkalu, työkalunpidike, työstökone) taajuusvastefunktioiden yhdistämisen koko järjestelmän kattavaksi taajuusvastefunktioksi. Kaikkien järjestelmän elementtien FRF on siis kuitenkin tiedettävä, mikä tarkoittaa useimmiten koejärjestelyä. RCSA-menetelmien avulla voidaan kuitenkin tarpeen mukaan yhdistellä eri elementtien eri menetelmillä ratkaistuja taajuusvastefunktioita. Samaan malliin voidaan siis yhdistää esim. yhden komponentin FE-analyysin avulla saatu ja toisen komponentin koemenettelyillä saatu funktio. [3] RCSA-menetelmistä saataisiin suurin hyöty, jos laitevalmistajat ilmoittaisivat komponenttien taajuusvasteen. Näin laitteen käyttäjä voisi välttää kokeet ja saada suhteellisen helposti koko järjestelmän taajuusvasteen.

Työkappalemateriaalin vaikutus prosessin dynamiikkaan kuvataan *työstövakioilla*, jotka kuvaavat materiaaliominaisuuksien vaikutusta työstövoimiin. Työstövakiot lasketaan useimmiten dynamometrin avulla mitatuista työstövoimista. Niitä voidaan kuitenkin pitää materiaalivakioina, joten usein saavutetaan hyväksyttävä tarkkuus käyttämällä taulukoituja arvoja. Laitteen käyttäjän ei siis tarvitse aina selvittää vakioita itse. [3]

3.1.2 Taajuustasoanalyysi ja aikatasosimulaatio

Kun järjestelmän värähtelykäyttäytyminen on karakterisoitu, voidaan siirtyä itse mallintamiseen. Mallintamismenetelmät voidaan jakaa kahteen kategoriaan: taajuustasossa operoiviin analyttisiin menetelmiin (*taajuustasoanalyysi*) ja aikatasossa operoiviin numeerisiin menetelmiin (*aikatasosimulaatio*). Kategoriat eivät kuitenkaan ole tarkkaan rajattuja; monet tutkijat ovat kehittäneet menetelmiä, jotka käyttävät hyväksi molempia lähestymistapoja. [3]

Taajuustasoanalyysi (frequency-domain analysis) on menetelmä, jossa ratkaistaan järjestelmän stabiliteettikuvaaja suoraan taajuusvastefunktiosta ja työstövakioista analyttisiä kaavoja käyttäen. Käytettävät kaavat vaihtelevat työstömenetelmän ja matemaattisen mallin mukaan. Taajuustasoanalyysin etu on, että sen avulla saadaan kerralla yleiskuva järjestelmän värähtelykäyttäytymisestä laajalla nopeusalueella. Stabiliteettikuvaaja saadaan siis kerralla ratkaistua. Huonona puolena analyttisen ratkaisun vaatimat yksinkertaistukset matemaattisessa mallissa saattavat aiheuttaa huomattavaa epätarkkuutta tuloksissa. [3]

Aikatasosimulaatio (time-domain simulation) on menetelmä, jossa työstöprosessin liikeyhtälö esitetään suljettuna dynaamisena silmukkana ja ratkaistaan numeerisen integroinnin avulla diskreetein aikavälein. Näin saadaan ratkaistua järjestelmän tila ajan suhteen. Aikatasosimulaation proseduuri on pääpiirteittäin seuraava:

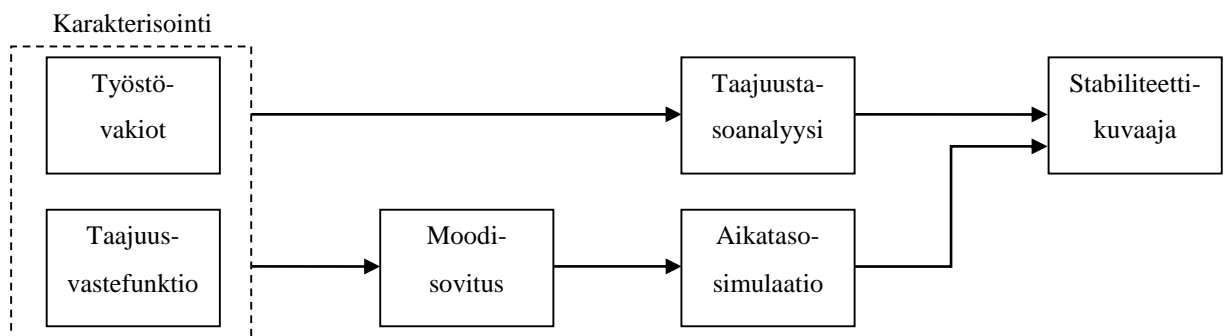
1. Määritetään hetkellinen lastunpaksuus työkalun siirtymän mukaan.
2. Määritetään leikkausvoima lastunpaksuuden mukaan.
3. Määritetään uusi siirtymä leikkausvoiman mukaan.
4. Toistetaan prosessi tietyllä aika-askeleella.

Stabiliteettikuvaajan ratkaisemisessa aikatasosimulaation avulla on taajuustasoanalyysiin verrattuna yksi ylimääräinen askel: *moodisovitus* (modal fitting), jonka avulla taajuusvastefunktiosta saadaan simulaation vaatimat parametrit. [1][3]

Aikatasosimulaation etu taajuustasoanalyysiin verrattuna on sen tarkkuus: sitä käyttämällä saadaan matemaattisesta mallista eliminoitua monia analyttisen ratkaisun vaatimista yksinkertaistuksista. Aikatasosimulaation etuna on myös se, että sen avulla saadaan ratkaistua prosessissa vaikuttavat voimat ja värähtelytasot tietyllä ajanhetkenä. Toisaalta taajuustasoanalyysin avulla saadaan kerralla yleiskuva järjestelmän stabiliteetista, siinä missä saman

aikaansaaminen aikatasosimulaatiolla vaatii useita simulaatioajoja. Lisäksi aikatasosimulaation saaminen robustiksi voi olla vaikeaa. [3]

Kuva 16 on havainnollistava kaavio matemaattisen mallintamisen proseduureista. Kuten kuvasta voidaan havaita, lopputulokseen eli stabiliteetti kuvaajaan voidaan päästä kahta eri polkua käyttäen. Valinta taajuustasoanalyysin ja aikatasosimulaation välillä riippuu tilanteesta. Taulukko 3 kertoo mallinnusmenetelmien ominaisuudet ja vertailee niiden etuja ja haittoja.



Kuva 16. Matemaattiset mallinnusmenetelmät: mallinnusproseduuri.

Taulukko 3. Mallinnusmenetelmät: yhteenveto.

	Taajuustasoanalyysi	Aikatasosimulaatio
Ominaisuudet	<ul style="list-style-type: none"> • Perustuu järjestelmän stabiliteetti kuvaajan ratkaisemiseen analyytisillä kaavoilla taajuusvastefunktiosta. • Antaa järjestelmän stabiliteetin yleiskuvan. 	<ul style="list-style-type: none"> • Perustuu järjestelmän liikeyhtälön ratkaisemiseen aikatasossa numeerisen integroinnin avulla. • Antaa järjestelmän tarkan tilan tietynä ajanhetkenä: työstövoimat ja värähtelytasot. • Ylimääräinen laskenta-askel: moodisovitus.
+	Globaali: tuottaa kerralla yleiskuvan järjestelmän värähtelykäyttäytymisestä.	Tarkka: eliminoi monet analyytisten menetelmien sisältämistä yksinkertaisuuksista.
-	Epätarkka: sisältää yksinkertaisuuksia.	Lokaali: tuottaa kerralla tuloksen vain yhdelle tapaukselle.

3.1.3 Esimerkkejä mallinnusmenetelmistä

Kirjallisuusselvityksessään Quintana ja Ciurana [1] esittelevät useita erilaisia mallinnusmenetelmiä. Tässä esitellään joidenkin niistä lisäksi myös muista lähteistä kerättyjä esimerkkejä.

Ensimmäiset regeneraatioilmiötä mallintavat menetelmät kehittivät 50- ja 60-lukujen vaihteessa Tobias ja Fishwick [13] sekä Tlusty ja Polacek [14]. Heidän kehittämänsä matemaattiset mallit pohjautuvat viiveellisiin differentiaaliyhtälöihin (delay differential equation, DDE). Suljettuna dynaamisena silmukkana lastuamisprosessin esitti ensin Merrit [15].

Yhden tavan viiveellisiin differentiaaliyhtälöihin perustuvan mallin ratkaisemiseksi esittivät Insperger ja Stépán [16]. Heidän menetelmässään DDE:t muutetaan semidiskretiointimenetelmää käyttäen sarjaksi riippumattomia tavallisia differentiaaliyhtälöitä, joilla on tunnetut ratkaisut. Myöhemmin Henninger ja Eberhard [17] esittivät tapoja menetelmiä semidiskretoinnin laskennallisen tehokkuuden parantamiseksi, parantaen näin myös edellisen menetelmän tarkkuutta.

Toisen tavan stabiilitteettikuvaajan ennustamiseen kehittivät Altintas ja Budak [18]. Heidän menetelmänsä käyttää nollannen kertaluvun Fourier-termiä leikkausvoiman vaihtelun likimääräiseen arviointiin tilanteissa, jossa vaihtelu on suhteellisen vähäistä. Myöhemmin Altintas kehitti menetelmää edelleen kolmiulotteiseksi malliksi [19].

Johtuen suurista eroista eri lastuamisoperaatioiden työkalugeometriassa ja kinematiikassa useimmat mallinnusmenetelmistä on kehitetty tietynlaista tapausta silmälläpitäen. Myös laajemmin sovellettavia menetelmiä on kuitenkin olemassa. Ensimmäisen näistä esitti Armarego [20] vuonna 2000. Uusimman edistysaskeleen tällä saralla ovat julkaisseet Altintas ja Kilick [21] aiemmin tänä vuonna. Heidän esittämässään yleistetyssä dynaamisessa mallissa erilaisten lastuamisprosessien geometriat ja kinematiikat otetaan huomioon käyttämällä yleistettyä muunnosmatriisia.

Kuten aiemmin kerrottiin, aika- ja taajuustasomenetelmiä voidaan myös yhdistää. Esimerkiksi Suh ja Liu [22] ovat esittäneet menetelmän, jossa työstöprosessin ohjaus suoritetaan yhtäaikaaisesti aika- ja taajuustasossa.

3.2 Esimerkkejä muista menetelmistä

Matemaattisten mallinnusmenetelmien jo mainituista ongelmista johtuen muitakin tapoja järjestelmän värähtelykäyttäytymisen selvittämiseen on kehitetty. Quintana ja Ciurana [1] käsittelevät selvityksessään myös näitä menetelmiä.

Eräs tapa stabiliteettikuvaajan määrittämiseen on kokeellinen. Koeajon aikana stabiliteetti-
raja määritetään muuttamalla kuvaajan toisen akselin arvoa (lastuamissyvyys/lastuamisno-
peus) toisen pysyessä vakiona ja tunnistamalla stabiliteetin menetys sen ilmetessä. Tämä
voidaan toteuttaa esim. käyttämällä jyrksinnässä kaltevapintaista koekappaletta, jolloin las-
tuamissyvyys nousee lineaarisesti työstön edetessä [23]. Kokeellisten menetelmien etu on
se, että ne eivät sisällä mallinnuksen yksinkertaistuksista johtuvaa epätarkkuutta. Niillä saatu
stabiliteettikuvaaja on kuitenkin validi vain tietyille työstökone-työkalu-työkappale-yhdistel-
mälle. [1] Tämän lisäksi korkean resoluution tai leveän nopeusalueen aikaansaaminen vaatii
monia koeajoja.

Kokeellisten menetelmien lisäksi myös tilastomatematiikkaan ja keinoälyyn perustuvia me-
netelmiä värähtelykäyttäytymisen selvittämiseen on kehitetty. Esimerkiksi Totis [24] on
esittänyt tilastollisen algoritmin (robust chatter prediction method, RCPM) työstövärähtely-
jen ennustamiseen jyrksinnässä ja Kotaiyah et al. [25] neurogeneettisen optimisaatiomenetel-
män stabiilien tilojen ennustamiseen sorvauksessa.

FE-analyysiä on käytetty pelkän työstökoneen dynamiikan määrittämisen lisäksi myös sta-
bilitietin simulointiin. Esimerkiksi Mahnama ja Movahhedy [26] ovat kehittäneet lastun-
muodostuksen FEM-simulointiin perustuvan värähtelyjen ennustamismenetelmän. FE-me-
netelmien avulla voidaan myös ottaa huomioon ohutseinämäisten työkappaleiden vaikutus:
Seguy et al. [27] ovat esittäneet FE-menetelmiin perustuvan tavan stabiliteettikuvaajan mää-
rittämiseen tällaisten kappaleiden jyrksinnässä.

4 POHDINTA

Työn johdannossa esitettiin neljä tutkimuskysymystä, joihin tässä luvussa pyritään vastaamaan. Koska kaksi ensimmäistä kysymystä käsiteltiin jo luvussa 2 ja kolmas luvussa 3, kerrotaan tässä osin jo aiemmin käsitellyä. Koska työ on esiselvitys, viimeisen tutkimuskysymyksen jälkeen pohditaan vielä mahdollisia jatkotutkimuskohteita.

4.1 Työstöväärähtelyt ja niiden syntymekanismit

Ensimmäinen johdannossa esitetyistä tutkimuskysymyksistä oli se, mitä työstöväärähtelyt ovat ja mistä ne syntyvät. Työstöväärähtelyjen ymmärtämiseksi tulee ymmärtää, kuinka ne eroavat muista lastuamisprosesseissa ilmenevistä väärähtelyistä.

Lastuavassa työstössä esiintyvät väärähtelyt voidaan jakaa kolmeen pääkategoriaan: *työstöväärähtelyihin*, *vapaisiin väärähtelyihin* ja *pakkoväärähtelyihin*. Vapaat väärähtelyt ja pakkoväärähtelyt syntyvät esim. työstölaitteen tai ympäristön häiriöistä tai materiaalivirheistä työkalupaleessa tai työkalussa. Näistä poiketen työstöväärähtelyt saavat alkunsa itsestään työstöprosessista, ja ne voidaan jakaa *primäärisiin* ja *sekundäärisiin* väärähtelyihin. Primääriset eli ei-regeneratiiviset työstöväärähtelyt voidaan jakaa moneen alikategoriaan, kuten kitkaväärähtelyihin, muotokytchentäväärähtelyihin ja termomekaanisiin väärähtelyihin. Niitä tärkeämpiä ovat kuitenkin sekundääriset eli regeneratiiviset väärähtelyt, joita pidetään työstöprosessin väärähtelyjen määräävänä mekanismina.

Regeneraatioilmiö johtuu etenkin sorvauksessa ja jyrsinässä tapahtuvasta leikkausten päällekkäisyydestä. Väärähtelevä työkalu jättää jälkeensä aaltomaisen pinnan, ja jos uuden ja vanhan leikkauksen aaltomuotojen välillä on vaihe-ero, aiheuttaa tämä lastunpaksuuden vaihtelua. Lastunpaksuuden vaihtelu taas puolestaan aiheuttaa vaihtelua lastuamisvoimassa, mikä saa työkalun värähtelemään entistä enemmän. Näin regeneratiiviset väärähtelyt aiheuttavat helposti leikkausprosessin stabiliteetin menetyksen.

Koska työstöväärähtelyt ovat kaikista lastuavassa työstössä esiintyvistä väärähtelyistä epätoivottavimpia ja vähiten hallittavissa, suurin osa alan tutkimuksesta kohdistuu juuri niihin. Usein tutkimus kohdistetaan juuri määräävän mekanismin eli regeneraatioilmiön häirintään.

4.2 Työstöväärähtelyjen välttäminen

Toinen tutkimuskysymys kuului: kuinka (millä keinoin) työstöväärähtelyjä voidaan välttää? Yleensä työstöväärähtelyjä ei ilmene, jos työstö suoritetaan hyvin alhaisilla työstöarvoilla (lastuamisnopeudella ja/tai -syvyydellä). Alhaisten työstöarvojen käyttö on kuitenkin tehontonta ja voi johtaa muihin ongelmiin, mikä on johtanut erilaisten väärähtelyjen välttämismenetelmien kehitykseen.

Työstöväärähtelyjen välttämiseen tähtäävät menetelmät voidaan jakaa kahteen pääkategoriaan, joista kumpikin jakautuu kahteen alikategoriaan. *Stabiiliusalueita hyödyntävät* menetelmät perustuvat työstöparametrien valitsemiseen stabiliteettikuvaajan stabiililta alueelta ja jakautuvat edelleen *prosessin ulkopuolisiin* sekä *prosessinaikaisiin* menetelmiin. *Järjestelmän käyttäytymistä muuttavat* menetelmät perustuvat stabiiliusrajan siirtämiseen järjestelmän käyttäytymistä muokkaamalla ja jakautuvat *passiivisiin* sekä *aktiivisiin* menetelmiin.

Prosessin ulkopuoliset menetelmät perustuvat järjestelmän väärähtelykäyttäytymisen ennakointiin ja työstöarvojen valintaan etukäteen siten, että työstöprosessi säilyy stabiilina. Niiden suurin etu on ongelmien välttäminen etukäteen, mutta menetelmien huonoja puolia ovat korkeat vaatimukset henkilökunnan asiantuntemukselle sekä järjestelmän dynamiikan tuntemukselle. Järjestelmän väärähtelykäyttäytyminen on tunnettava tarkoin ainakin käytetyllä nopeusalueella, mikä voi usein vaatia koejärjestelyjä tai muita erityistoimenpiteitä.

Prosessinaikaiset menetelmät perustuvat stabiliteetin menetyksen ajonaikaiseen tunnistamiseen ja työstöarvojen säätämiseen siten, että prosessi siirtyy stabiiliin tilaan. Menetelmien ongelma on myöhästynyt reagointi stabiliteetin menetykseen. Etuna kuitenkin on helppous: järjestelmän dynamiikkaa ei tarvitse analysoida etukäteen, toisin kuin prosessin ulkopuolissa menetelmissä.

Passiivisten menetelmien periaate on järjestelmän dynaamisen jäykkyyden kasvattaminen lisäämällä siihen erilaisia passiivisia komponentteja. Nämä komponentit voivat esim. toimia väärähtelyvaimentimina tai häiritä työstöväärähtelyjen syntymekanismeja. Ne ovat siis aina sidoksissa työstöjärjestelmän rakenteeseen. Käyttäjä voi vaikuttaa niihin lähinnä hankinnoillaan: esimerkiksi vaimennettuja tai dynaamiselta jäykkyydeltään parannettuja työkaluja ja työstölaitteita on saatavilla.

Kuten prosessinaikaiset menetelmät, myös *aktiiviset menetelmät* perustuvat työstöprosessin jatkuvaan valvontaan sensorien avustuksella. Aktiivisissa menetelmissä käytetään kuitenkin myös (esim. pietsosähköisiä) toimilaitteita värähtelyjen syntymekanismien häiritsemiseen. Näille menetelmille tunnuksenomaista on järjestelmän kyky automaattisesti tunnistaa ongelmatilanne, tehdä päätökset sekä suorittaa toimenpiteet tilanteen korjaamiseksi. Ne ovat siis passiivisia menetelmiä edistyneempi mutta myös nuorempi tutkimushaara.

4.3 Värähtelykäyttäytymisen mallintaminen

Kolmantena johdannossa kysyttiin, kuinka (millä keinoin) työstöprosessin värähtelykäyttäytymistä voidaan mallintaa. Mallintamismenetelmät ovat yksi prosessin ulkopuolisten stabiiliusalueita hyödyntävien menetelmien kategorioista. Niissä tiedot fyysisen järjestelmän dynamiikasta yhdistetään ko. työstöprosessista kehitettyyn matemaattiseen malliin. Menetelmien tavoitteena on saada selville prosessin *stabiliteettikuvaaja*, jota voidaan käyttää stabiilien työstöarvojen valinnassa.

Matemaattista mallinnusmenetelmää käytettäessä on ensin karakterisoitava järjestelmän dynamiikka sekä työstettävä materiaali. Järjestelmän dynamiikka karakterisoidaan selvittämällä sen *taajuusvaste* joko kokeellisesti (kokeellinen moodianalyysi) tai muilla keinoin (esim. FE-analyysi). Tämä vaste on hyvin herkkä järjestelmän muutoksille, joten esim. työkalun vapaapituuden muutoksella voi olla huomattava vaikutus vasteeseen. Työstettävä materiaali otetaan huomioon *työstövakioilla*, joita voidaan nimensä mukaisesti pitää materiaali-*vakioina*. Yleensä riittävään tarkkuuteen siis päästään käyttämällä taulukoituja arvoja.

Dynamiikan selvittämisen jälkeen voidaan siirtyä itse mallintamiseen. Matemaattiset mallinnusmenetelmät voidaan karkeasti jakaa kahteen pääkategoriaan: *taajuustasoanalyysiin* ja *aikatasosimulaatioon*. Taajuustasoanalyysissä stabiliteettikuvaaja ratkaistaan suoraan taajuusvasteesta ja työstövakioista. Menetelmän etuna on se, että sillä saadaan kerralla yleiskuva järjestelmän käyttäytymisestä laajalla nopeusalueella. Huonona puolena analyttisen ratkaisun vaatimat yksinkertaistukset matemaattisessa mallissa saattavat johtaa epätarkkuuksiin. Aikatasosimulaatiossa työstöprosessin liikeyhtälö ratkaistaan numeerisen integroinnin avulla diskreetein aikaväleihin. Ratkaisun vaatimat parametrit saadaan taajuusvasteesta *moodisovituksen* avulla. Simulaatiolla saadaan tarkka tulos prosessin tilasta (voimista ja värähtelytasoista) tietynä ajanhetkenä, mutta yleiskuvan saaminen voi olla vaikeaa.

4.4 Menetelmien käytännöllisyys

Vain viimeinen tutkimuskysymys on enää käsittelemättä: mitkä menetelmistä ovat edellytystensä ja muiden ominaisuuksiensa perusteella käytännössä käyttökelpoisia? Koska työhön ei kuulunut kokeita tai simulaatioita, konkreettisia tuloksia ei voida esittää. Selvityksessä ilmeni kuitenkin useita seikkoja, jotka voivat olla hyödyksi jatkoa ajatellen.

Prosessin ulkopuoliset stabiiliusalueita hyödyntävät menetelmät ovat menetelmistä ainoita, joita voidaan toteuttaa ilman lisäanturointeja tai muutoksia laitteen rakenteessa. Näihin menetelmiin kuuluvien matemaattiseen mallinnukseen pohjautuvien menetelmien käyttökelpoisuus on suurelta osin sidoksissa niihin liittyvään järjestelmän taajuusvasteen selvittämismenetelmään. Itse matemaattista mallia voidaan luultavasti ajaa oikein valitulla ohjelmistolla normaalissa PC-ympäristössä, ja mallin syöttämisessä ohjelmistoon ei pitäisi olla erityisiä vaikeuksia. Järjestelmän taajuusvastefunktion selvittäminen voi kuitenkin olla huomattavasti vaativampaa.

Ehkä (käyttäjälle) edullisin tapa taajuusvasteen selvittämiseksi olisi järjestelmän eri komponenttien taajuusvasteen yhdistäminen RCSA-menetelmällä. Jokaisen komponentin taajuusvaste on tietenkin ensin tiedettävä. Jos laitevalmistajat pystyisivät toimittamaan valmista miensa komponenttien taajuusvasteet käyttäjälle, koko järjestelmän vaste olisi varsin helppo selvittää. Näin varsinkin jos käyttäjällä olisi käytössään erityisesti tähän suunniteltu ohjelmisto sekä materiaalin työstövakiot. Muut menetelmät ovat vaativampia: kokeellinen moodianalyysi vaatii henkilökunnalta asiantuntemusta sekä erityistyökaluja. FE-analyysiin pohjautuvien menetelmien käyttö taas on käyttäjän päässä lähes mahdotonta, kuten aiemmin todettiin. Laitevalmistajat ovat siis suurelta osin vastuussa näiden menetelmien käytön helpoudesta tai vaikeudesta.

Muista värähtelykäyttäytymisen selvittämismenetelmistä puhtaasti kokeelliset menetelmät vaativat jälleen paljon työtä ja asiantuntemusta. Lisäksi ne tuottavat tuloksen, joka on validi vain tietylle materiaalille ja järjestelmälle. Tilastolliset ja keinoälyyn perustuvat menetelmät jäivät tässä selvityksessä lähinnä kuriositeeteiksi. Niiden käyttökelpoisuuden selvittäminen olisi kuitenkin mielenkiintoista.

Muihin kolmeen kategoriaan kuuluvat välttämismenetelmät ovat vielä edellä mainittujakin kiinteämmin sidoksissa laitteistoon. Kaksi menetelmästä (prosessinaikaiset menetelmät ja aktiiviset menetelmät) vaativat järjestelmältä oikeanlaiset anturoinnit, joiden asentaminen jälkikäteen voi olla vaikeaa. Aktiiviset menetelmät vaativat lisäksi toimilaitteita, joita ei luultavasti voida jälkikäteen asentaa. Passiivisissa menetelmissä on myös kyse laitteen rakenteesta ja siihen asennetuista vaimentavista komponenteista. Kaikissa menetelmissä laitevalmistaja on siis hyvin tärkeässä roolissa.

4.5 Jatkotutkimuskohteet

Koska tämä tutkimus on vasta tiivistelmä ilmiöstä ja esiselvitys jatkotutkimukselle, mahdollisia jatkotutkimuskohteita on runsaasti. Tässä esitetään niistä muutamia.

Tutkimukseen ei kuulunut simulaatioajoja tai käytännön kokeita, joten menetelmien käyttökelpoisuuden testaus tai vertailu käytännössä olisi looginen seuraava askel. Tätä ennen on kuitenkin selvítettävä ja päätettävä useita asioita. Mitä menetelmistä vertaillaan ja mihin? Mitä ominaisuuksia vertaillaan? Kuinka vertailu suoritetaan, etenkin erityyppisten menetelmien kesken? Nämä joitain kysymyksistä, joihin tutkimuksessa luultavasti törmätään.

Koska tämän selvityksen pääkohde olivat mallinnusmenetelmät, muihin värähtelyjen välttämismenetelmiin ei suuremmin syvennytty. Muissakin menetelmissä kuitenkin riittää tutkittavaa, ja etenkin aktiiviset menetelmät ovat nuori ja mielenkiintoinen tutkimushaara. Niiden nopea kehitys saa kuitenkin aikaan sen, että asiasta tehty selvitys voisi vanhentua varsin nopeasti, ja yliopistoympäristössä uuden tekniikan kehittäminen tällä saralla saattaisi vaatia liian erikoistunutta laitteistoa.

Viimeiseksi, olisi perusteltua tehdä jonkinlainen selvitys siitä, millä tasolla laitevalmistajien osallisuus värähtelyjen välttämässä nykypäivänä on. Koska niin monet värähtelyjen vaimennusmenetelmistä riippuvat laitevalmistajan toiminnasta jollain tasolla, olisi hyödyllistä tietää, mitä laitevalmistajat jo tekevät tai rakentavat laitteisiinsa. Tämä kuitenkin vaatisi suhteellisen laajaa yhteistyötä monien laitevalmistajien kanssa, ja on epäselvää kuinka suurta osaa omien menetelmiensä yksityiskohdista laitevalmistajat haluavat pitää salassa.

5 YHTEENVETO

Lastuavassa työstössä esiintyvät *työstöväärähtelyt* ovat yleinen ja ongelmallinen ilmiö, joka on tuttu myös Lappeenrannan teknillisen yliopiston konepajatekniikan laboratoriossa työskenteleville. Ilmiö on paitsi varsin monimutkainen, myös taloudellisesti merkittävä: molemmat syytä, jotka ovat osaltaan tehneet siitä alan tutkijoiden jatkuvan kiinnostuksen kohteen. Tämä tutkimus on tarkoitettu suomenkieliseksi selvitykseksi ilmiöstä ja sen syntymekanismeista sekä ilmiön välttämiseen tähtäävien menetelmien lyhyeksi esittelyksi.

Lastuamisprosesseissa esiintyvät värähtelyt voidaan energianlähteensä mukaan jakaa *työstöväärähtelyihin, vapaisiin värähtelyihin ja pakkovärähtelyihin*. Työstöväärähtelyt ovat näistä epätoivottavimpia ja vähiten hallittavissa. Työstöväärähtelyihin kuuluvaa regeneratiivista värähtelymekanismia, joka syntyy työstökierrosten päällekkäisyydestä, pidetään koko lastuamisprosessin värähtelyjen dominoivana mekanismina.

Työstöprosessin stabiiliuden varmistamismenetelmät voidaan jakaa kahteen pääkategoriaan: *stabiiliusalueita hyödyntäviin ja järjestelmän käyttäytymistä muuttaviin* menetelmiin. Nämä jakautuvat edelleen *prosessin ulkopuolisiin ja prosessinaikaisiin* sekä *passiivisiin ja aktiivisiin* menetelmiin. Työssä kiinnitettiin erityishuomiota prosessin ulkopuolisiin stabiiliusalueita hyödyntäviin menetelmiin, joiden käytön edellytyksenä on järjestelmän stabiliteettikuvaajan selvittäminen. Tähän on olemassa erilaisia keinoja, kuten empiiriset kokeet ja matemaattiset mallit. Matemaattisessa mallintamisessa fyysisen järjestelmän dynamiikasta kerätyt tiedot yhdistetään työstöprosessista kehitettyyn malliin. Mallinnuksen pääkeinot ovat *taajuustasoanalyysi ja aikatasosimulaatio*.

Prosessin ulkopuoliset menetelmät ovat ainoita menetelmiä, joiden käyttö ei välttämättä vaadi muutoksia työstölaitteeseen. Ne ovat kuitenkin menetelminä monimutkaisia ja asiantuntemusta vaativia. Niiden ja kaikkien muidenkin värähtelyjen välttämismenetelmien käytön helpottamisessa ovat avainasemassa työkalu- ja laitevalmistajat.

Koska kyseessä on vasta esiselvitys, jatkotutkimuskohteita on runsaasti. Loogisesti seuraava askel olisi menetelmien käyttökelpoisuuden testaus tai vertailu käytännössä.

LÄHTEET

- [1] Quintana, G., Ciurana, J. 2011. Chatter in machining processes: A review. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 51:5, s. 363-376. E-julkaisu.
- [2] Maaranen, K. 2012. *Koneistus*. 1. painos. Sanoma Pro Oy. Helsinki. ISBN 978-952-63-0284-3.
- [3] Schmitz, T.L., Smith, K.S. 2009. *Machining Dynamics: Frequency Response to Improved Productivity*. E-kirja. Springer. ISBN 978-0-387-09645-2.
- [4] Isakov, E. 2004. *Engineering Formulas for Metalcutting*. Industrial Press Inc. ISBN 978-0-8311-3174-6.
- [5] Cheng, K., Huo, D. 2009. *Basic Concepts and Theory*. Teoksessa Cheng, K. (toim.) *Machining Dynamics: Fundamentals, Applications and Practices*, s. 7-20. E-kirja. Springer. ISBN 978-1-84628-368-0.
- [6] Eynian, M. Internet-sivu. University West. <http://www.hv.se/en/research/researchers/alphabetically/mahdi-eynian>
- [7] Eynian, M. 2010. *Chatter Stability of Turning and Milling with Process Damping*. Väitöskirja. The University of British Columbia.
- [8] Altintas, Y., Weck, M. 2004. Chatter Stability of Metal Cutting and Grinding. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 53:2, s. 619-642. E-julkaisu.
- [9] Budak, E. 2009. *Dynamic Analysis and Control*. Teoksessa Cheng, K. (toim.) *Machining Dynamics: Fundamentals, Applications and Practices*, s. 21-84. E-kirja. Springer. ISBN 978-1-84628-368-0.

- [10] Håkansson, L., Johansson, S., Claesson, I. 2007. Machine tool noise, vibration and chatter prediction and control. Teoksessa Crocker, M.J. (toim.) Handbook of Noise and Vibration Control, 995-1000. E-kirja. John Wiley & Sons. ISBN 978-1-61583-474-7.
- [11] Wiercigroch, M., Budak, E. 2001. Sources of nonlinearities, chatter generation and suppression in metal cutting. Philosophical Transactions of the Royal Society A 359 (1781), 663-693. E-julkaisu.
- [12] Trelleborg AB. Internet-sivu. <http://www.trelleborg.com>
- [13] Tobias, S.A., Fishwick, W. 1958. Theory of Regenerative Machine Tool Chatter. The Engineer 258.
- [14] Tlustý, J., Poláček, M. 1963. The Stability of Machine Tools against Self-excited Vibrations in Machining. International Research in Production Engineering (1963), s. 465–474.
- [15] Merrit, H.E. 1965. Theory of self-excited machine-tool chatter-contribution to machine tool chatter research. ASME Journal of Engineering for Industry (1965), s. 447–454.
- [16] Insperger, T., Stépán, G. 2004. Updated semi-discretization method for periodic delay-differential equations with discrete delay. International Journal for Numerical Methods in Engineering 61:1, s.117–141.
- [17] Henninger, C., Eberhard, P. 2008. Improving the computational efficiency and accuracy of the semi-discretization method for periodic delay-differential equations, European Journal of Mechanics, A/Solids 27:6, s. 975–985.
- [18] Altintas, Y., Budak, E. 1995. Analytical prediction of stability lobes in milling. CIRP Annals—Manufacturing Technology (1995).

- [19] Altintas, Y. 2001. Analytical prediction of three dimensional chatter stability in milling. *JSME International Journal, Series C: Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing* 44:3, s. 717–723.
- [20] Armarego, E.J.A. 2000. The Unified-Generalized Mechanics of Cutting Approach - A Step Towards a House of Predictive Performance Models for Machining Operations. *Journal of Machining Science and Technology* 4:3, s. 319–362.
- [21] Altintas, Y., Kilic, Z.M. 2013. Generalized dynamic model of metal cutting operations. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 62, s. 47-50. E-julkaisu.
- [22] Suh, C.S., Liu, M-K. 2013. Control of Cutting Vibration and Machining Instability: A Time-Frequency Approach for Precision, Micro and Nano Machining. E-kirja. John Wiley & Sons. ISBN 978-1-118-37182-4.
- [23] Quintana, G., Ciurana, J., Teixidor, D. 2008. A new experimental methodology for identification of stability lobes diagram in milling operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 48:15, s. 1637–1645.
- [24] Totis, G. 2009. RCPM - A new method for robust chatter prediction in milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 49:3-4, s. 273–284.
- [25] Kotaiah, K.R., Srinivas, J., Babu, K.J. 2010. Prediction of optimal stability states in inward-turning operation using genetic algorithms. *International Journal of Machining and Machinability of Materials* 7:3-4 2, s.11–225.
- [26] Mahnama, M., Movahhedy, M.R. 2010. Prediction of machining chatter based on FEM simulation of chip formation under dynamic conditions. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 50:7, s. 611–620.
- [27] Seguy, S., Campa, F.J., de Lacalla, L.N.L., Arnaud, L., Dessen, G., Aramendi, G. 2008. Toolpath dependent stability lobes for the milling of thin-walled parts. *International Journal of Machining and Machinability of Materials* 4:4, s. 377–392.